



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MODERNÍ TRENDY V TRÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ -
FRÉZOVÁNÍ A MIKROFRÉZOVÁNÍ**

MODERN MANUFACTURING TRENDS IN CHIP MACHINING - MILLING AND MICROMACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Tkadlec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jiří Tkadlec**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Polzer, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Moderní trendy v třískovém obrábění - frézování a mikrofrézování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zadaná práce je faktografickou rešerší na dané téma. Cílem je, aby charakterizovala hlavní moderní trendy v technologiích třískového obrábění v oblasti mikrofrézování.

Cíle diplomové práce:

- stručná charakteristika třískového obrábění - frézování a mikrofrézování,
- rešerše na zadané téma,
- zpracování citovaných odborných literárních zdrojů formou stručné databáze.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, T., MAREK, J. Mít sondu nestačí. Olomoucká 1164/85, Brno: Renishaw s.r.o., 2017. 121 s. ISBN: 978-80-87017-20-3.

GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

GUPTA, K. (ed.). Advanced manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-56098-4.

DAVIM, J. P. (ed.) Traditional machining processes. 1. New York: Springer, 2014. ISBN 978-366-2450-871.

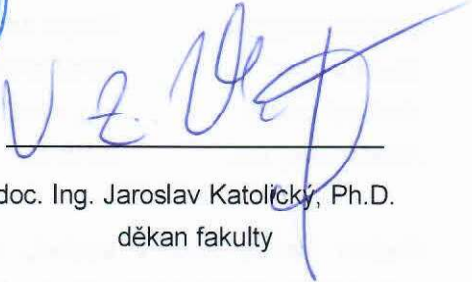
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 15. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na rešeršní rozbor mikro-frézování s cílem specifikovat nejnovější poznatky a trendy v oblasti frézování a mikro-frézování. Úvodní částí práce je specifikace mikro-frézování a rozdíly v porovnání s konvenčním frézováním. Hlavním cílem práce je interpretace moderních trendů technologie mikro-frézování, jako je vývoj strojů, pokročilé strategie obrábění a nejnovější CAD/CAM softwaru. Druhá část se věnuje vlivu řezných parametrů na celkovou kvalitu obrobku. Závěrečná část práce je věnována aplikaci a využití technologie mikro-frézování.

Klíčová slova

Mikro-obrábění, mikro-frézování, trendy v třískovém obrábění, dentální protetika, řezné materiály

ABSTRACT

The thesis is focused on the research on micro-milling with the aim to specify the latest findings and trends in milling and micro-milling. The introduction consists of the specification of micro-milling and its comparison with conventional milling. The main goal of the thesis is to interpret modern trends in micro-milling technology, such as machine modernization, advanced machining strategies and the latest CAD/CAM software. The second part deals with the influence of cutting parameters on the overall workpiece quality. The final part is devoted to the application and use of micro-milling technology.

Key words

Micro-cutting, micro-milling, trends in chip manufacturing, dental replacement, cutting materials

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TKADLEC, Jiří. *Moderní trendy v třískovém obrábění - frézování a mikrofrézování*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116337>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Polzer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Moderní trendy v třískovém obrábění - frézování a mikrofrézování** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

Datum

Bc. Jiří Tkadlec

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a čas věnovaný při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Žídkovi, za cenné rady a připomínky, které mi byly přínosem pro vypracování této diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří mým rodičům a přátelům, za jejich podporu, motivaci a trpělivost během celého mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA TRÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ A MIKRO-FRÉZOVÁNÍ.....	10
1.1 Fyzikální průběh řezného procesu	10
1.2 Frézování.....	10
1.3 Mikro-frézování	13
1.3.1 Rozdíly mezi mikro-frézováním a konvenčním frézováním	13
1.3.2 Velikostní efekt „ <i>size effect</i> “	14
1.4 Stroje pro mikro-frézování	17
1.5 Řezné nástroje pro mikro-frézování	18
1.5.1 Řezné materiály pro výrobu nástrojů.....	19
1.5.2 Rychlořezné oceli	20
1.5.3 Slinuté karbidy	21
1.5.4 Kubický nitrid bóru.....	22
1.5.5 Polykrystalický diamant	23
1.6 Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování	23
1.6.1 Broušení nástrojů	23
1.6.2 Elektroerozivní obrábění mikro-fréz	24
2 MODERNÍ TRENDY V OBLASTI FRÉZOVÁNÍ	25
2.1 Modernizace strojů pro mikro-frézování	25
2.2 Zařízení pro upínání frézovacích nástrojů.....	29
2.2.1 Teplené upínače	29
2.2.2 Polygonální upínací systém - TRIBOS.....	33
2.3 Výroba mikro-fréz pomocí metody fokusovaného iontového svazku	37
2.4 Laserové obrábění mikro-nástrojů	37
2.5 Povlakování řezných nástrojů	39
2.6 Dokončovací strategie frézování s použitím nástrojů částečného tvaru kulové plochy.....	42
2.7 CAM Software HyperDENT.....	44
2.7.1 Hybrid modul	45
2.7.2 Modul pro výrobu šikmých kanálků v zubních náhradách „ <i>Anglulated Screw Channel Module</i> “	47

3	VÝZKUMNÉ TRENDY V OBLASTI MIKRO-FRÉZOVÁNÍ	50
3.1	Vliv geometrie nástroje na průběh řezného procesu	50
3.1.1	Vliv geometrie na strukturu povrchu	51
3.1.2	Analýza tvorby otřepů	52
3.1.3	Povrchové vady.....	53
3.2	Měření opotřebení nástrojů	54
4	APLIKACE A VYUŽITÍ MIKRO-FRÉZOVÁNÍ	56
4.1	Materiály pro výrobu součástí mikro-frézováním.....	56
4.2	Využití mikro-frézování v medicíně	57
4.2.1	Dentální protetika	57
4.2.2	Mikro-kanálky „lab-on-a-chip“	58
4.3	Mikro-frézování v elektrotechnice	59
4.4	Obecné aplikace mikro-frézování	60
	ZÁVĚR	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Třískové obrábění je ve strojírenství jednou z nejdůležitějších technologií výroby součástí. Výsledného tvaru součásti je docíleno pomocí vnikání břitů nástroje do obráběného materiálu a úběru materiálu ve formě třísky. Jednou z progresivních metod třískového obrábění je v současné době mikro-frézování, které umožňuje vyrábět součásti s malými rozměry v řádu několika milimetrů, složitými tvary a vysokou geometrickou přesností.

Mikro-frézování se od konvenčního frézování liší tloušťkou odebíraného materiálu, která je v řádu tisícín milimetru. Obecně lze řezný proces považovat za mikro-frézování, dosahuje-li průměr nástroje 1 mm a méně. Častým problémem vyskytujícím se u této technologie je tzv. velikostní efekt, který zamezuje správné tvorbě třísky a dochází pouze k elastické a plastické deformaci. Faktory ovlivňující vznik velikostního efektu jsou poloměr zaoblení ostří nástroje a tloušťka třísky. Stroje pro mikro-frézování mají zvýšené nároky na přesnost a ustavení z důvodu eliminace vnějších vlivů. Vzhledem k použití nástrojů malých průměrů musí vřetená strojů dosahovat vysokých otáček (až 200 000 min⁻¹).

Hlavní částí této práce je interpretace moderních trendů v oblasti frézování a mikro-frézování. Cílem modernizace je neustálé zvyšování produktivity, přesnosti a hospodárnosti. Velkým pokrokem je tzv. multifunkčnost strojů, kdy jeden stroj dokáže splnit požadavky různých obráběcích strojů. Převážná většina současných strojů má 5osý obráběcí systém. Vhodnou metodou pro upínání nástrojů je tepelné upínání a polygonální upínací systém. Novodobými metodami pro výrobu mikro-fréz je metoda fokusovaného iontové svazku nebo laserové obrábění, které umožňují výrobu nástrojů v řádu desítek mikrometrů. Povlakování nástrojů zajišťuje zlepšení řezných vlastností a zvýšení životnosti nástroje. Ke zvyšování produktivity a kvality obrábění přispívají i nové strategie a nástroje, jako je např. obrábění nástroji s částečným tvarem kulové plochy. Oblast vývoje CAD/CAM softwarů pro mikro-frézování poskytuje např. inovativní programovací software HyperDENT pro výrobu dentálních náhrad.

Mikro-frézování vyžaduje správnou volbu geometrie řezných nástrojů a optimálních řezných podmínek. Použití teoretických předpokladů pro konvenční frézování nemusí při mikro-frézování vždy dosahovat předpokládaných výsledků. Kapitola 3 Výzkumné trendy je zaměřena na vliv použití odlišných nástrojů a řezných podmínek na celkovou kvalitu obrobené plochy. Druhá část kapitoly je zaměřena na problematiku stanovení velikosti opotřebení nástrojů pro mikro-frézování.

V závěrečné části jsou specifikovány hlavní aplikace a využití technologie mikro-frézování, jako je například medicínský, elektrotechnický a letecký průmysl.

1 CHARAKTERISTIKA TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ A MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

Technologie třískového obrábění se řadí mezi způsoby výroby, kde je dosaženo požadovaného tvaru součásti pomocí odebrání materiálu ve formě třísek za pomoci řezného nástroje. Třísky jsou odpadním materiálem během obrábění. Její velikost a tvar závisí převážně na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách, geometrii a materiálu řezného nástroje. Utváření třísky je docíleno vnikáním břitů řezného nástroje do materiálu při daných řezných podmínkách. Mezi hlavní druhy třískového obrábění patří soustružení, frézování, vrtání a broušení.

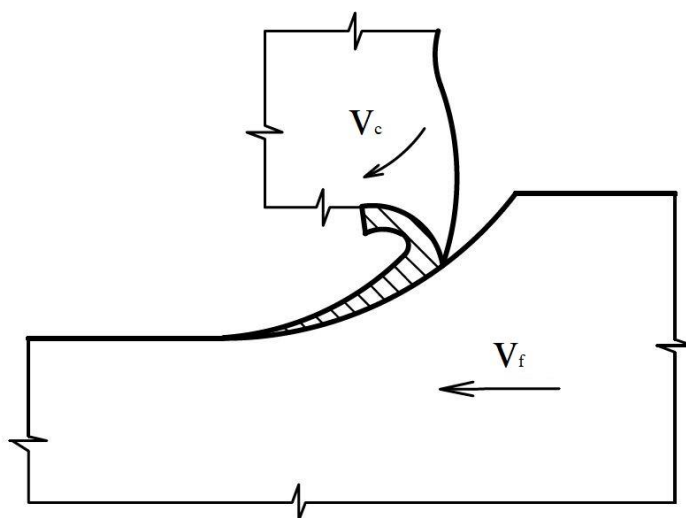
1.1 Fyzikální průběh řezného procesu

Během řezného procesu dochází vlivem vnikání břitu řezného nástroje do obráběného materiálu a k silovému namáhání celé obráběcí soustavy, kterou tvoří stroj-nástroj-obrobek. Velikosti a směry řezných sil závisí při obrábění především na geometrii nástroje a řezných podmínkách. Stanovení průběhu těchto sil je zásadní pro optimalizaci řezného procesu, aby nedošlo k destrukci nástroje nebo poškození stroje. [1]

Hlavním cílem obrábění je dosažení požadovaných parametrů povrchu, geometrie a rozměrové přesnosti obrobku. Jednou z hlavních problematik třískového obrábění je mechanismus tvorby třísky, neboť tvorba třísky značně ovlivňuje celkový proces obrábění.

1.2 Frézování

Frézování je další způsob třískového obrábění, u kterého koná hlavní řezný pohyb rotující několikabřitý nástroj. Vedlejší řezný pohyb neboli posuv, zpravidla koná obrobek. Mimo rozdílu v hlavním řezném pohybu se frézování liší oproti soustružení v tom, že řezný proces je přerušovaný a v průběhu řezu se mění průřez odebírané třísky. Obrázek 1.1 zobrazuje změnu průřezu třísky během řezného procesu.



Obr. 1.1 Změna průřezu třísky při sousledném frézování.

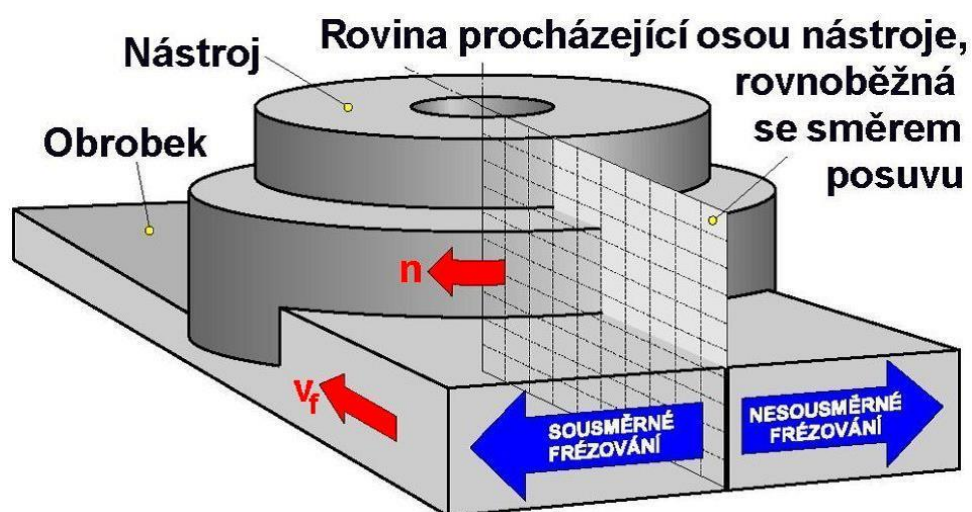
Základní dělení frézování je na frézování čelní a válcové frézování. Dále je možno frézování rozdělit na nesousledné a sousledné. Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti posuvu obrobku. Průřez třísky je na počátku řezu nulový a postupně roste k maximální hodnotě. Naopak při sousledném frézování je smysl otáčení nástroje ve směru posuvu obrobku a průřez třísky je na začátku řezu největší a při výjezdu břitu z řezu je průřez nulový.

Výhody nesousledného frézování [1]:

- průběh řezu je plynulejší, břit vstupuje do záběru postupně a nedochází k rázovému zatížení frézy
- nehrozí samovolné posunutí obrobku vlivem vůle mezi posuvovým šroubem a maticí
- opotřebení břitu nezávisí na stavu povrchu obrobku a případných nečistot (okuje, písčité povrch)
- umožňuje použití většího řezného výkonu

Výhody sousledného frézování [1]:

- lepší drsnost povrchu obrobku
- řezná síla zatlačuje obrobek do upínacího přípravku, je tudíž možno použít menší upínacích sil
- vyšší trvanlivost břitů
- menší sklon ke kmitání nástroje
- menší sklon k tvorbě nárůstku na čele břitu



Obr. 1.2 Čelní frézování [1].

Nástroje pro frézování jsou vícebřité a je možné je rozdělit do jednotlivých skupin podle několika hledisek [1]:

- a) podle umístění zubů:
 - na válcové (mají zuby pouze na válcové ploše)
 - na čelní (zuby pouze na čelní ploše)
 - na válcové čelní (zuby mají jak na válcové tak i na čelní ploše)
 - kotoučové
- b) podle smyslu otáček:
 - pravotočivé
 - levotočivé
- c) podle konstrukční provedení:
 - celistvé (celý nástroj je z jednoho kusu materiálu)
 - s vloženými břitovými destičkami
 - s vyměnitelnými břitovými destičkami
- d) podle počtu zubů:
 - jemnozubé
 - polohrubozubé
 - hrubozubé
- e) podle upnutí:
 - stopkové
 - nástrčné
- f) podle materiálů břitů:
 - z rychlořezné oceli
 - ze slinutého karbidu
 - z cermetů
 - z řezné keramiky
 - z kubického nitridu bóru
 - z polykrystalického diamantu

1.3 Mikro-frézování

Mikro-frézování je technologie třískového obrábění, která se specializuje na výrobu součástí, její konečné rozměry jsou v řádu několika milimetrů. Je to univerzální metoda, kterou lze vyrábět rovinné, rotační i obecné plochy. Tato technologie je zásadní pro rozvoj mikroprůmyslu a nanotechnologií. Nachází velké uplatnění například v oblasti lékařské a biomedicínské výroby (výroba zubních implantátů, kardiostimulátorů). Další využití je v leteckém průmyslu, optice a elektrotechnice [2, 3]. Obrázek 1.3 zobrazuje 5osé frézování vstřikovací formy nástrojem o průměru 0,5 mm.

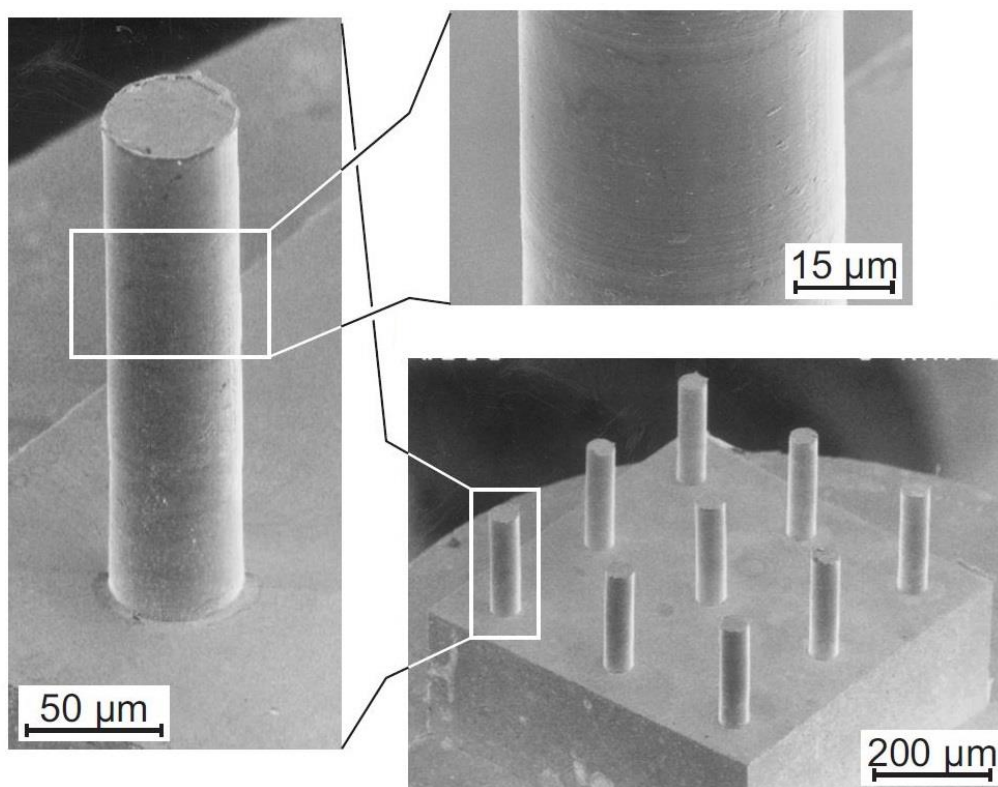


Obr. 1.3 5osé mikro-frézování nástrojem o průměru 0,5 mm [4].

1.3.1 Rozdíly mezi mikro-frézováním a konvenčním frézováním

Ačkoliv je mikro-frézování z kinematického hlediska velmi podobné konvenčnímu frézování, v mnoha aspektech lze najít značné odlišnosti. Především jsou kladeny jiné požadavky na používané stroje a to převážně v jejich technických parametrech jako jsou maximální dosažitelné otáčky vřetene a celková přesnost stroje. Vřetena strojů Microgantry micro 3/5X od firmy Kugler dosahují maximálních otáček $200\,000\text{ min}^{-1}$ a jejich přesnost je $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$. V oblasti řezných nástrojů jsou kladeny vyšší nároky z hlediska jejich přesnosti, než je tomu u konvenčních frézovacích nástrojů. [2]

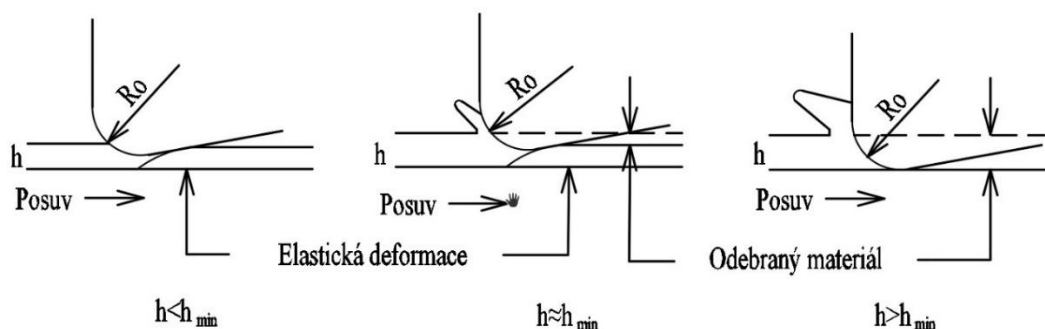
Hranice mezi konvenčním frézováním a mikro-frézováním je možno posoudit podle několika aspektů. Např. pokud je požadováno, aby výsledná geometrie dosahovala rozměru $500\text{ }\mu\text{m}$ a méně, lze tento výrobní proces považovat za mikro-frézování (obrázek 1.4). Řezný proces lze definovat jako mikro-frézování, pokud nástroj dosahuje průměru 1 mm a méně [3]. Velkým rozdílem u mikro-frézování oproti konvenčnímu frézování je častý výskyt tzv. velikostního efektu. (viz. kapitola 1.3.2 Velikostní efekt „size effect“).



Obr. 1.4 Válcovité věžičky vyrobené mikro-frézováním [5].

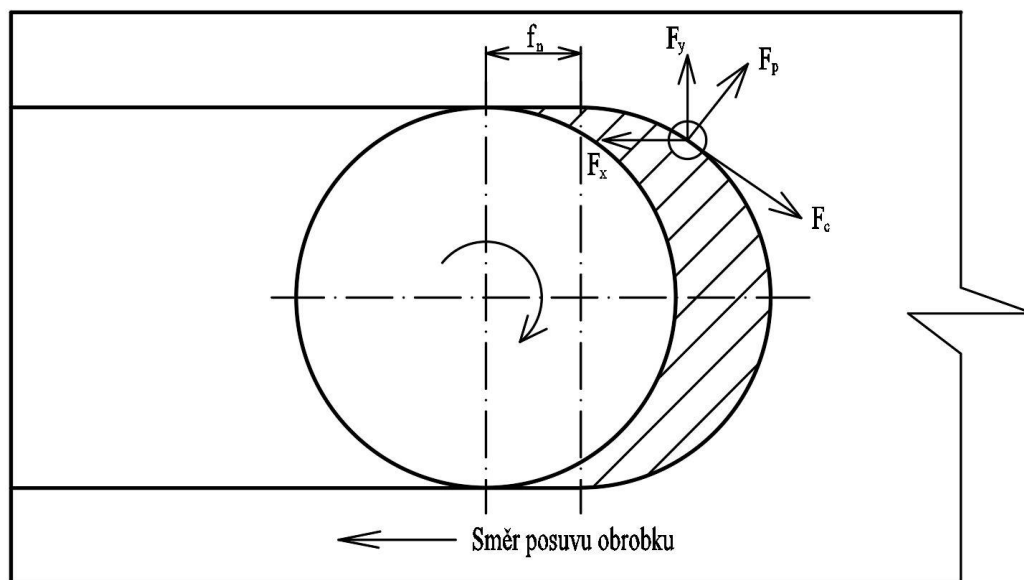
1.3.2 Velikostní efekt „size effect“

Při zmenšování velikosti obrobků vznikají jisté problémy a jednou z hlavních problematik, která se vyskytuje u mikro-obrábění, je označován jako „size effect“. Je to nežádoucí efekt a jeho vznik je ovlivněn dvěma hlavními faktory. Jedním z nich je poloměr ostří nástroje R_0 a druhým je tloušťka odebírané třísky h . Pokud se poměr tloušťky třísky a poloměr ostří nástroje dostane pod kritickou hodnotu, může nastat tento efekt. V takovém případě dochází k vytvoření vysoce negativního úhlu čela, přestane se tvořit tříska a materiál je vtlačován pod nástroj. Dochází tak pouze k elastické deformaci, nikoliv k úběru materiálu [2, 6]. Obrázek 1.5 zobrazuje vliv poloměru ostří na tvorbu třísky.



Obr. 1.5 Schéma znázorňující vliv poloměru ostří nástroje na tvorbu třísky (podle [2]).

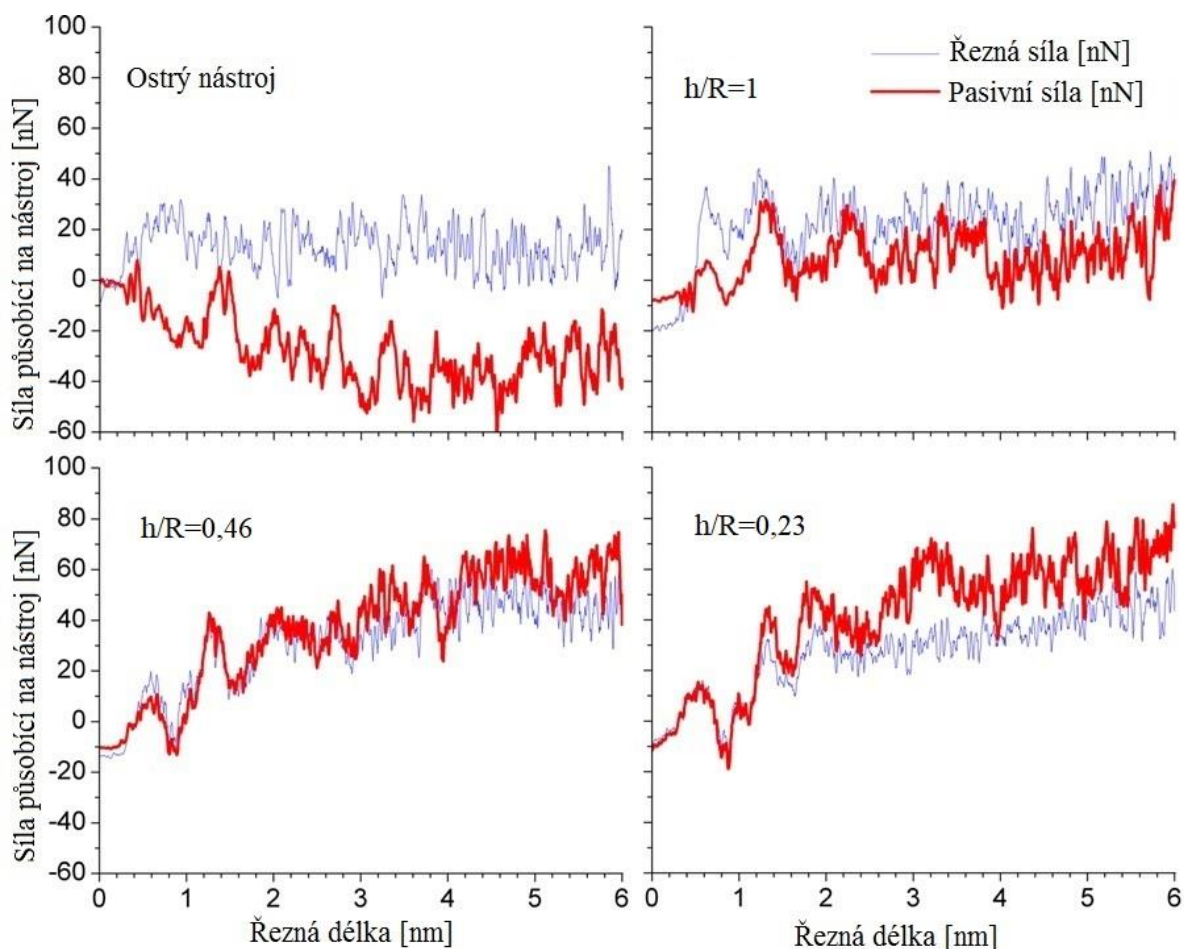
Tento stav nastane, pokud je hloubka řezu 22–36 % poloměru ostří nástroje [6]. Pro každý nástroj je důležitým parametrem tzv. minimální tloušťka třísky, při které je zaručena tvorba třísky. Minimální tloušťka třísky je ovlivněna především poloměrem ostří nástroje. Částečně je ale ovlivněna i obráběným materiálem a řeznými podmínkami [2]. Vznik tohoto efektu je možno detekovat např. pomocí silových vlivů na nástroj při řezném procesu, převážně poměrem velikosti řezné a pasivní síly (obrázek 1.6). S narůstající elastickou deformací se více projevuje velikostní efekt a tím vzrůstá pasivní síla. Obrázek 1.7 zobrazuje změnu řezné a pasivní síly v závislosti na poměru tloušťky odebrané třísky a poloměru ostří nástroje.



Obr. 1.6 Rozklad sil při mikro-frézování (podle [7]).

F_x =síla v ose X	[N]
F_y =síla v ose Y	[N]
F_c =řezná síla	[N]
F_p =pasivní síla	[N]
f_n =posuv na otáčku	[mm]

Při obrábění nástrojové oceli X153CrMoV12 (19 573) nástrojem o průměru 0,2 mm a poloměrem ostří $0,25 \mu\text{m}$ dosahuje řezná síla hodnoty přibližně $F_c=1,5 \text{ N}$ s řeznou rychlostí $v_c=75 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuvem na zub $f_z=0,1 \mu\text{m}$ a axiální šířce záběru hlavního ostří řezu $a_p=20 \mu\text{m}$.



Obr. 1.7 Grafy znázorňující závislost řezné a pasivní síly na poměru tloušťky třísky (h) a poloměru ostří nástroje (R) (podle [6]).

Pozn. :

Povlakováním řezných nástrojů pro mikro-frézování se značně zvětšuje poloměr ostří nástroje. Tloušťky povlaků tak musí být co nejmenší. Pro povlakování tenkých vrstev je vhodná například technologie **HIPIMS** (High-power impulse magnetron sputtering), která je založena na principu technologie PVD . [8]

1.4 Stroje pro mikro-frézování

Stroje používané pro mikro-frézování mají velmi vysoké požadavky rozměrovou i geometrickou přesností. Tolerance rozměrové přesnosti by měla být alespoň 1 μm . U geometrické tolerance by se odchylka od rovinnosti měla pohybovat v rozmezí 10–50 nm. Z důvodu malých řezných sil není u strojů vyžadována vysoká statická tuhost, ale je nutné, aby byla dodržena teplotní stálost. [9]

U strojů pro mikro-frézování je zásadní jejich umístění a ustavení. Oblast, kde se umísťují tyto stroje, musí být bez vnějších vlivů, jako například vibrací od ostatních strojů nebo od otřesů železniční dopravy. Tyto vibrace by mohly zásadně ovlivnit přesnost obrábění nebo zapříčinit destrukci nástroje. Ustavení strojů je pomocí elementů, jako jsou například vzduchové, olejové nebo hydrodynamické tlumiče, které v co největší míře eliminují vnější vlivy. [2]

Vzhledem k průměru nástrojů, které obvykle dosahují pouze několik desetin milimetrů, musí být vřetena schopna dosáhnout potřebných otáček, aby při obrábění byla zajištěna optimální řezná rychlost. Vřetena strojů dosahují otáček až 200 000 min^{-1} [2]. Například pro obrábění materiálu Al99.5 je optimální řezná rychlost 176 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ [10]. Při použití nástroje o průměru 0,4 mm je pro dosažení této rychlosti nutné zajistit otáčky vřetene 140 000 min^{-1} . Aby vřetena byla schopna dosahovat tak vysokých otáček, používají se pro uložení speciální vzduchová ložiska. Tyto ložiska využívají tenkou vrstvu stlačeného vzduchu, která brání fyzickému kontaktu mezi rotující částí a pevně ustavené části. Nedochází tak k žádným ztrátám vlivem tření a ložiska mají velmi dlouhou životnost. Nevýhodou těchto ložisek je neschopnost snášet velké síly a rázy. Vzhledem k tomu, že řezné síly a rázy jsou u mikro-frézování minimální, jsou tato ložiska pro vřetena strojů ideální [11].

Výrobci strojů pro mikro-frézování [2]:

- KERN Microtechnic (Eschelohe, Německo)
- Kugler GmbH (Salem, Německo)
- FANC (Oshino, Japonsko)
- DATRON (Milford, USA)

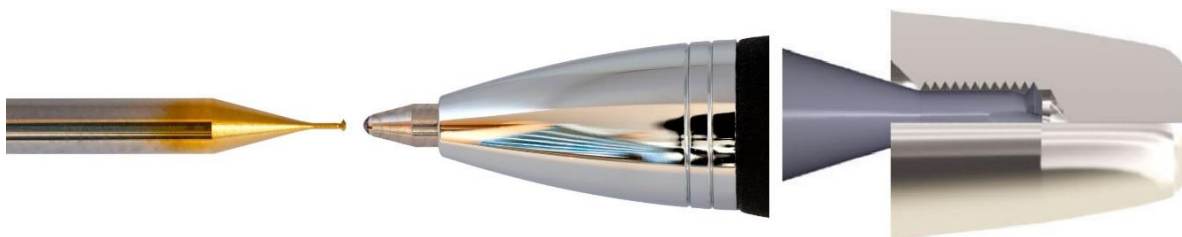
Obrázek 1.8 zobrazuje 5osou CNC frézku KERN micro. Vřeteno dosahuje otáček 42 000 min^{-1} . Stroj je řízen pomocí systému Heidenhain TNC 640 [12].



Obr. 1.8 CNC frézka KERN Micro s řídicím systémem Heidenhain TNC 640 [12].

1.5 Řezné nástroje pro mikro-frézování

Kvalita nástroje závisí především na jeho geometrii a materiálu, ze kterého je vyroben. Řezný nástroj musí být schopen dobře oddělovat materiál a vhodně utvářet a odvádět třísku z místa řezu. Toho je docíleno správnou geometrií nástroje a optimálními řeznými podmínkami.



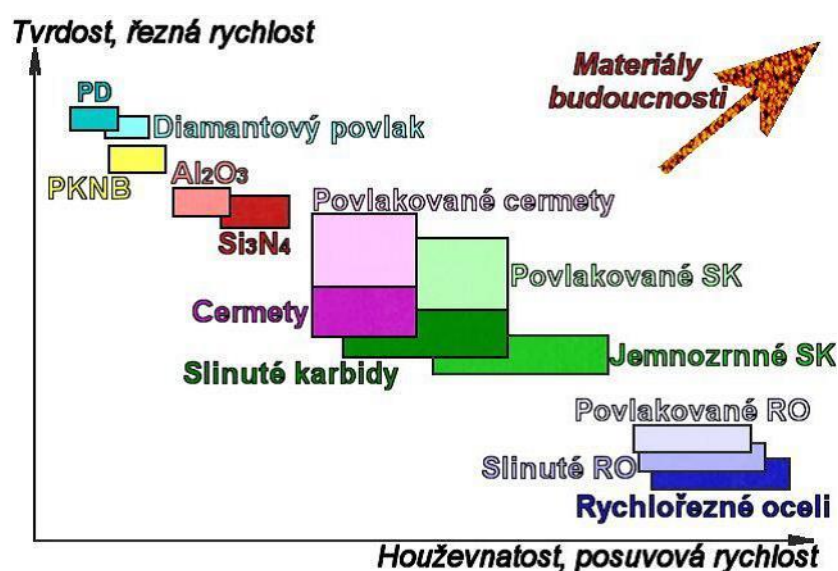
Obr. 1.9 Nástroj pro výrobu vnitřního závitu, výrobce WhizCut (Helsingborg, Sweden) [13].

U nástrojů pro mikro-frézování je důležitým parametrem poloměr ostří břitů nástroje, u kterého je požadována co možná nejmenší hodnota. V případě velkého poloměru ostří může nastat tzv. „size effect“, který je nežádoucí a neumožňuje optimální úběr materiálu (viz kapitola 1.3.2 Velikostní efekt „size effect“).

1.5.1 Řezné materiály pro výrobu nástrojů

V současné době je poměrně široký sortiment materiálů používaný pro výrobu řezných nástrojů. V poslední době nastal ve vývoji materiálů velký pokrok s nástupem CNC strojů a snahou o zvýšení produktivity. Celosvětový výzkum nových materiálů přináší stále dokonalejší materiály s dříve nevídanými vlastnostmi, jako je například extrémní tvrdost nebo možnost pracovat na vysokých teplot.

U materiálů pro výrobu řezných nástrojů jsou požadovány tři základní vlastnosti. Materiál musí mít vysokou tvrdost, která zvyšuje odolnost proti opotřebení a celkově tak prodlužuje životnost nástroje. Vyšší tvrdost také umožňuje použití vyšší řezné rychlosti. Aby byl nástroj schopen snášet rázové síly a byl dostatečně pevný, musí být materiál dostatečně houževnatý. Nástroje z houževnatých materiálů umožňují obvykle odebírat větší průřez třísky. Obecně platí, že materiály s vyšší tvrdostí se vyznačují nižší houževnatostí – viz obrázek 1.10. Cílem vývoje materiálů je dosáhnout vysoké tvrdosti při zachování houževnatosti. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je povlakování nástrojů. Lze tak získat velmi tvrdého povrchu, ale zároveň si nástroj zachová houževnaté jádro. [1]



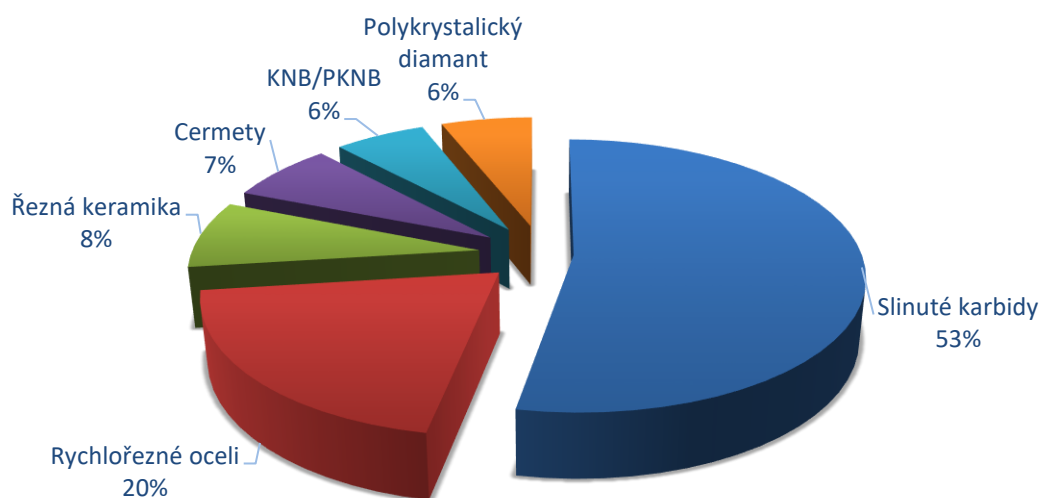
Obr. 1.10 Vliv mechanických vlastností na řezné podmínky [1].

Rozdělení řezných materiálů

Pro výrobu řezných nástrojů je používáno celé spektrum kovových (například oceli, litiny, slitiny Al, slitiny Ni, slitiny Ti) i nekovových (keramika, vláknově vyztužené kompozity) materiálů [14, 15].

V současné době mezi nepoužívanější materiály patří:

- rychlořezné oceli
- slinuté karbidy (povlakované i nepovlakované)
- řezná keramika
- supertvrdé materiály (polykrystalický diamant, kubický nitrid bóru)



Obr. 1.11 Současný přehled používaných nástrojových materiálů (podle [16]).

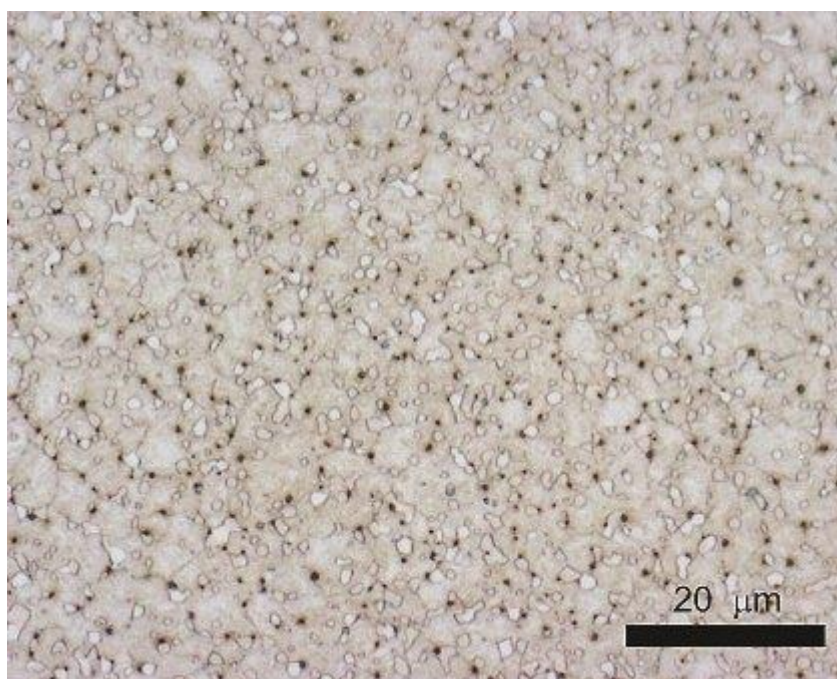
1.5.2 Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli spadají do kategorie nástrojových ocelí (NO), které jsou jedním z prvních materiálů používaných pro řezné nástroje. V současnosti mají NO pořád značný podíl na výrobě nástrojů a to převážně z důvodu vysoké houževnatosti a nízké ceny. Naopak nevýhodou těchto materiálů je nízká tvrdost a nízká tepelná odolnost. Z toho důvodu se NO používají pro nízké řezné rychlosti ($25\text{--}50\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) [14]. Pro zlepšení mechanických vlastností je nutné NO tepelně zpracovat.

Samostatnou skupinou nástrojových ocelí je rychlořezná ocel (RO), známá jako HSS (*High Speed Steel*). Svůj název získaly od možnosti použití při vyšších řezných rychlostech (až $50\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). S nástupem dnešních materiálů není již tato rychlost považována za vysokou. RO mají na rozdíl od běžných NO vyšší tvrdost a schopnost snášet vyšší teploty (do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jejich tvrdost je dána kvalitou tepelného zpracování a obsahem karbidotvorných prvků jako jsou wolfram (W), chrom (Cr), vanad (V), molybden (Mo).

Obsah uhlíku (C) obvykle nepřesahuje 1 %. Tvrdost RO se pohybuje v rozmezí 63 – 67 HRC. Pevnost v ohybu dosahuje hodnot 3000–4000 MPa. [1, 14]

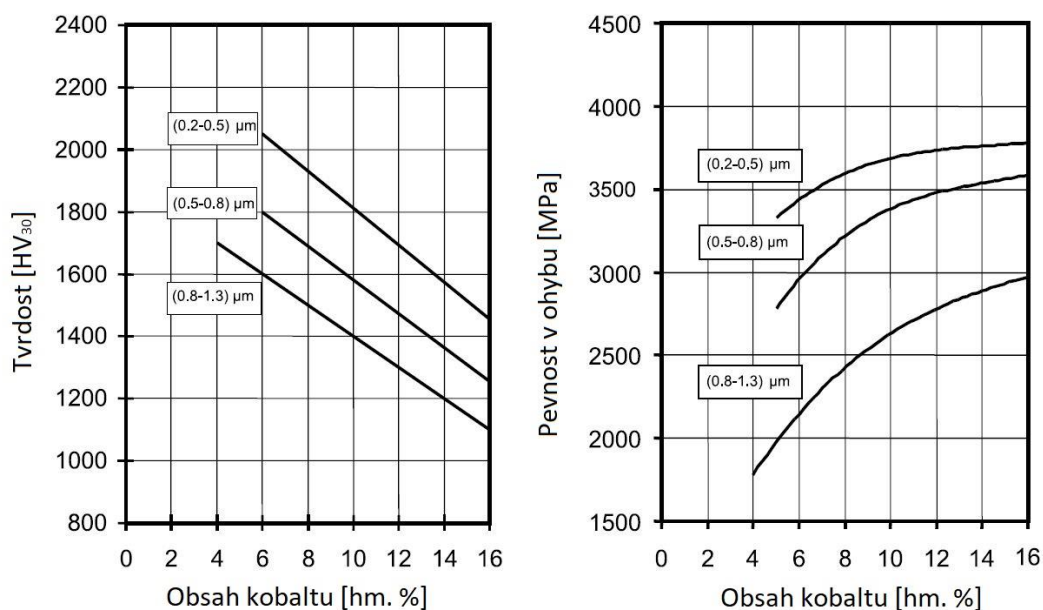
K výraznému pokroku rychlořezných ocelí došlo koncem 20. století, kdy se na trhu prosadili rychlořezné oceli vyráběné technologií práškové metalurgie, tzv. HSS-PM (*High Speed Steel – Powder Metallurgy*). Podstatou práškové metalurgie je vytvoření cílového tvaru nástroje (břitu) zpracováním výchozí suroviny (prášku) působením tlaku a teploty. Maximální dosažená teplota nesmí přesáhnout teplotu tavení alespoň jedné ze složek obsažené v prášku. Předností této technologie je možnost kombinace různých materiálů, např. kovových a nekovových. [16, 17]



Obr. 1.12 Struktura rychlořezné oceli vyrobené technologií práškové metalurgie [16].

1.5.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy (SK) patří mezi nejpoužívanější materiály pro výrobu řezných nástrojů. Jsou vyráběny práškovou metalurgií, jejíž princip spočívá ve spékání, neboli slinování, velmi tvrdých karbidů kovů. Základním karbidem pro výrobu SK je karbid wolframu (WC). Dalšími přidávanými karbidy je například karbid titanu (TiC) a karbid tantalu (TaC). Slabým místem SK je jeho pojivo. Kov, který se používá jako pojivo, je kobalt (Co). Podíl a velikost zrn WC mají vliv na výslednou tvrdost a pevnost slinutého karbidu (viz obrázek 1.13). S rostoucím obsahem Co se zvyšuje pevnost v ohybu, ale nastává pokles tvrdosti. Slinuté karbidy s jemnozrnnými WC vykazují vyšší tvrdost na úkor pevnosti [15, 18, 19]. Dosažení soudobých řezných vlastností slinutých karbidů je dosaženo povlakováním břitů řezných nástrojů. Povlakované SK jsou v současnosti dominantním materiálem pro řezné nástroje. V současnosti až 90 % vyráběných slinutých karbidů je povlakovaných [16]. V tabulce 1.1 jsou uvedeny základní druhy a použití slinutých karbidů.



Obr. 1.13 Vliv obsahu Co a velikost zrn WC na výslednou tvrdost a ohybovou pevnost (podle [19]).

Tabulka 1.1 Rozdělení slinutých karbidů dle ČSN ISO 513 (podle [15, 20]).

Skupina	Značení	Oblast použití
P	Modrá	Materiály tvořící dlouhou třísku Uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické korozivzdorné oceli
M	Žlutá	Materiály tvořící dlouhou a střední třísku Lité oceli, austenitické korozivzdorné oceli a tvárné litiny
K	Červená	Materiály tvořící krátkou a drobnou třísku Šedá temperovaná litina, nekovové materiály
N	Zelená	Neželezné kovy, slitiny Al a Cu
S	Hnědá	Žárupevné slitiny na bázi Ni a Ti, Titan a Ti slitiny
H	Šedá	Zušlechťené oceli na 1500 MPa, kalené oceli HRC 48-60

1.5.4 Kubický nitrid bóru

Je známo, že kubický nitrid bóru (KNB) dosahuje mimořádně vysoké tvrdosti, kterou si zachovává i za velmi vysokých teplot (až 2000 °C). KNB je tak možné použít pro vysoké řezné rychlosti. Při obrábění tak vykazuje KNB zvýšenou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a je u něj vždy zajištěna dobrá chemická stabilita. KNB má ve srovnání s keramikou vyšší tvrdost i houževnatost. Využití KNB omezuje převážně jeho vysoká cena, ale i tak nachází své uplatnění při obrábění kalených ocelí, které bylo doposud nutno brousit. Obrábění s nástroji vyrobených z kubického nitridu bóru činí alternativu za technologii broušení. [21]



Obr. 1.14 Mikro-fréza o průměru 0,5 mm s břitem vyrobeným z KNB [22].

1.5.5 Polykrystalický diamant

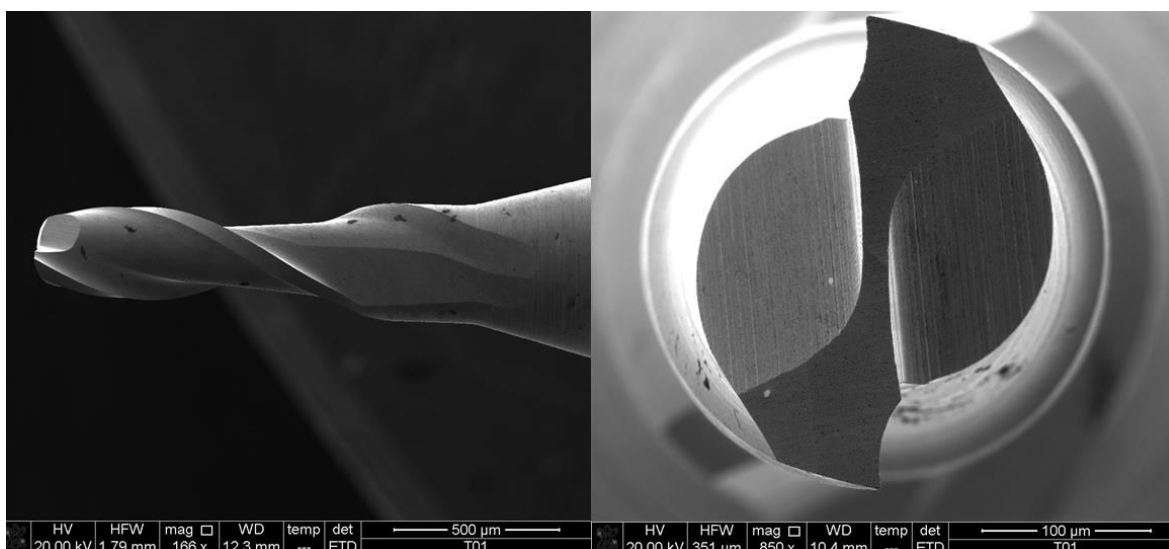
Mezi další supertvrdé řezné materiály je zařazen i polykrystalický diamant (PKD). Nejedná se o přírodní diamant, ale o synteticky vyráběný za vysokých teplot a tlaků. Je tvořen pouze jedním prvkem a to uhlíkem (C). Díky uspořádání atomů v krystalické mřížce je velmi tvrdý. Nástroje z PKD nejsou vhodné k obrábění materiálů na bázi železa (ocel, litina). Při zvýšené teplotě dochází k silné difúzi uhlíku a následně k rychlému opotřebení nástroje.

1.6 Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování

Výroba řezných nástrojů pro mikro-frézování je řazena rovněž do technologie mikro-obrábění. Vzhledem k malým rozměrům nástrojů je jejich výroba náročná a vyžaduje vysokou přesnost výroby. V současné době existuje řada výrobců zabývajících návrhem a výrobou mikro-nástrojů. K významným světovým výrobcům mikro-nástrojů patří například japonská firma Kyocera (Kyoto, Japonsko).

1.6.1 Broušení nástrojů

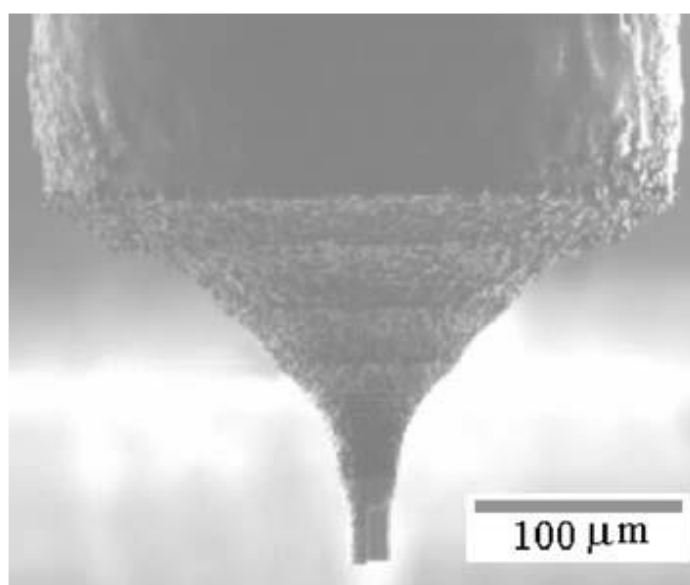
Mezi základní způsob výroby řezných nástrojů pro mikro-frézování patří broušení. Tato metoda poskytuje vysokou produktivitu výroby nástrojů, ale umožňuje vyrábět pouze nástroje o průměru 0,1 mm a více. Jedná se o konvenční metodu obrábění s vyššími nároky na přesnost. Výsledná kvalita nástroje se odvíjí od kvality brousícího kotouče, velikosti abrazivních zrn a rádiusu brousící hrany. Tento proces je doprovázen velkými silami, které mohou vést k destrukci nástroje během výroby. Při broušení vzniká značné množství tepla, jenž může negativně ovlivnit mikrostrukturu materiálu nástroje. [23]



Obr. 1.15 Ukázka dvoubřité mikro-frézy vyrobené metodou broušení [24].

1.6.2 Elektroerozivní obrábění mikro-fréz

Velké uplatnění v této oblasti nachází i metoda EDM (Electric Discharge Machining) neboli elektroerozivní obrábění. EDM patří do skupiny nekonvenčních metod obrábění a nachází velké uplatnění ve výrobě složitějších tvarů a v obrábění těžkoobrobitelných a tvrdých materiálů. Podstatou elektroerozivního obrábění je úběr materiálu vlivem elektrické energie. Mezi elektrodou a obrobkem vzniká elektrický výboj, který odpařuje malé částčky materiálu obrobku. Celý proces probíhá ponořený v dielektrické kapalině (destilovaná voda, petrolej), tudíž je zamezeno tepelnému ovlivnění materiálu. Jelikož nedochází k fyzickému kontaktu mezi elektrodou a obrobkem, je tím také eliminováno silové namáhání. Velkou nevýhodou této metody je možnost obrábět pouze elektricky vodivé materiály. [25, 26]



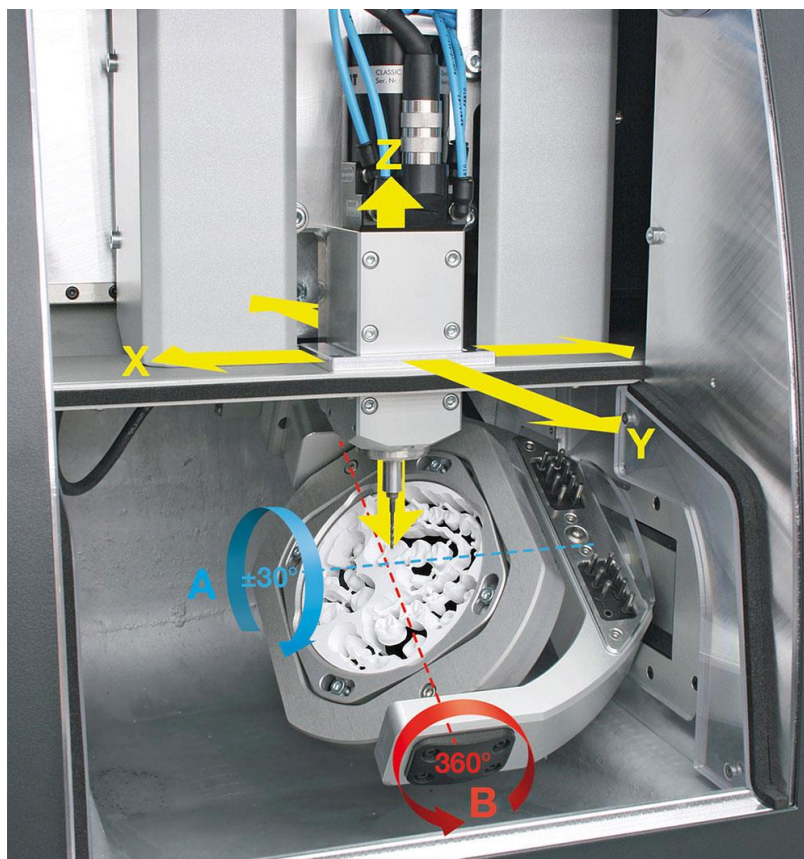
Obr. 1.16 Mikro-frézovací nástroj vyroben metodou EDM [26].

2 MODERNÍ TRENDY V OBLASTI FRÉZOVÁNÍ

Cílem vývojových trendů je neustálé zvyšování produktivity a přesnosti výroby, hospodárnost výroby a minimální dopad na životní prostředí. Významným pokrokem je tzv. multifunkčnosti strojů. Stroj tak dokáže realizovat požadavky různých výrobních technologií. Typickým příkladem kombinace frézování a soustružení, nebo sloučení třískového obrábění s nástroji s definovanou geometrií a nedefinovanou geometrií. Lze tak minimalizovat, nebo úplně eliminovat technologii broušení, které je časově i ekonomicky náročná. I přesto, že tyto stroje jsou na trhu již řadu let, současná doba stále přináší velké množství technicko-ekonomických konstrukčních výzev jak v oblasti výroby strojů, nástrojů, tak i nových strategií výroby.

2.1 Modernizace strojů pro mikro-frézování

V současnosti převážná většina strojů má 5osý systém obrábění, který zahrnuje 3 lineární osy X, Y, Z. Přidáním dvou rotačních os, vzniká 5osý obráběcí systém, který umožňuje rotaci pracovní plochy ve dvou osách, obvykle označovány A a B (obrázek 2.1). Tento systém vede k možnosti obrábět součásti nejen z boční strany, ale i ze spodní strany obrobku. Obrobek tak stačí upnout pouze jednou a není nutné jej znovu upínat z důvodu obrobení v těžko dostupných místech. Eliminuje se tak chyba, která by vznikala při opětovném upnutí. Lze tak efektivně vytvářet velmi sofistikované tvary, kterých bylo v minulosti velmi těžko dosáhnout. Rotace pracovní plochy tak zajišťuje neustálý kontakt nástroje s obrobkem. Další předností je zkrácení výrobních časů. To vede ke zvýšení produktivity, což je nynějším hlavním cílem všech výrobních procesů. Ve srovnání s 4osými frézky vyžadují 5osé frézky náročnější seřízení systému a při nesprávné kalibraci se může projevit menší přesnost. [27]



Obr. 2.1 Zobrazení jednotlivých os u 5osého obráběcího systému [27].

Frézka **Datron D5 LS** (Obr. 2.2) je speciálně vyvinuta pro výrobu v dentálním průmyslu. Všechny parametry, jako je např. velikost a výkon stroje, jsou výhradně uzpůsobeny k frézování dentální protetiky. Automatický výměník nástrojů nabízí funkci sledování aktuálního poškození nástroje a řízení životnosti nástroje. Do zásobníků je možné umístit až 15 nástrojů. Integrovaná automatizace umožňuje bezobslužný provoz až 100 po sobě jdoucích hodin. Tento provoz je zajištěn pomocí automatické výměny polotovaru. Celkově může zásobník obsahovat až 8 polotovarů, který je určen pro upínání standardizovaného polotovaru o průměru 98,5 mm a tloušťce 10–25 mm [28]. Stroj D5 LS je vybaven řídicím systémem Heidenhain s vřetenem dosahující maximálních otáček 50 000 min⁻¹ a přesností $\pm 5 \mu\text{m}$ [29].



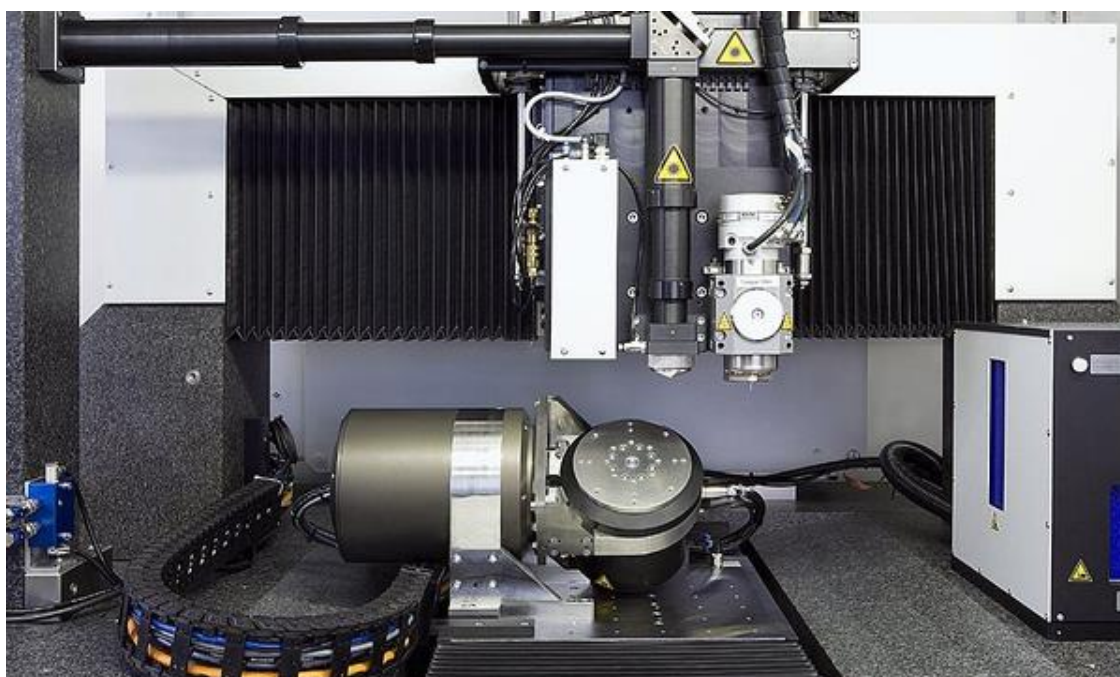
Obr. 2.2 5osá frézka Datron D5 LS s řídicím systémem Heidenhain [29].

Řada strojů **MICROMASTER** a **MICROGANTRY** od firmy **KUGLER GmbH** jsou vysoce přesné CNC obráběné tříosé až 5osé obráběcí centra, která jsou speciálně navržena a optimalizována pro mikro-obrábění. Základna stroje je vyrobena z jemnozrnné žuly, která zaručuje tepelnou stabilitu a účinně eliminuje vibrace v kombinaci s pasivními vzdušnými tlumiči. [30]

Obrázek 2.3 zobrazuje frézovací centrum **MICROGANTRY nano3/5X**. Stroj je standardně dodáván se třemi lineárními osy. V kombinaci s otočnou jednotkou poskytuje stroj 4osé nebo 5osé obrábění (viz obrázek 2.4). Velikost pracovní plochy je 300 x 300 x 200 mm. Vřeteno stroje je uloženo v hydrostatickém nebo vzduchovém ložisku a dosahuje otáček až $200\,000\text{ min}^{-1}$. Lineární osy jsou schopny dosáhnout vysokých dynamických vlastností, zrychlení v lineárním směru je $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ s maximální rychlostí $12\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Celková dosažitelná přesnost stroje je $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$. [30]



Obr. 2.3 Frézovací centrum MICROGANTRY nano3/5X od firmy KUGLER [30].



Obr. 2.4 Otočný přípravek pro funkci 4. a 5. osy [30].

2.2 Zařízení pro upínání frézovacích nástrojů

V oblasti upínání mikro-fréz jsou kladeny vysoké požadavky na geometrické přesnosti, rotačně-symetrické provedení a co možná největší tlumení vibrací. Maximální házivost by měla být menší než 0,003 mm a stupeň vyvážení G2,5 při 25 000 min⁻¹. Konvenční upínací přípravky, jako je například sklíčidlo nebo kleštinové upínače, nejsou schopny těchto parametrů dosáhnout a je s nimi obtížnější manipulace. Seběmenší tříska usazená uvnitř upínače může negativně ovlivnit jeho přesnost a způsobit jeho opotřebení. Vhodným typem jsou tepelné, polygonální upínací systémy. Mezi přední světové výrobce upínacích systému patří firma SCHUNK.

2.2.1 Teplené upínače

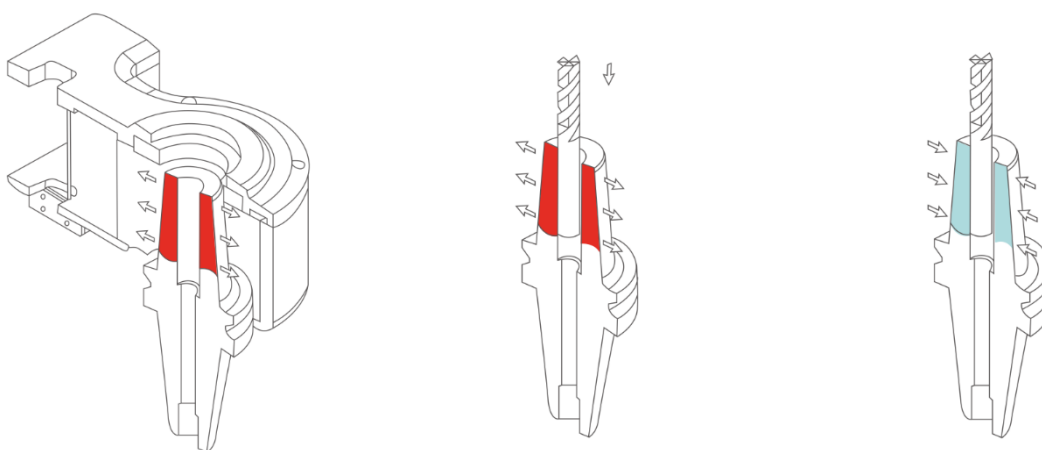
Tento způsob upínání je stále více prosazován při obrábění kovu a v oblasti mikro-frézování je poměrně rozšířený. Nabízí vysoce přesný způsob upnutí s minimálním obvodovým házením. Přednost spočívá v rotačně symetrickém provedení a bez přídavných elementů jako jsou čelisti nebo upínací šrouby.



Obr. 2.5 Ultraštíhlá upínací pouzdra řady TUS [31].

Princip upínače

Princip upínače je založen na tepelné roztažnosti materiálu, díky které po zahřátí na teplotu 250-350 °C dochází ke zvětšení vnitřního průměru upínače v řádu několika setin milimetru. Tím je umožněno vložení stopkové části nástroje do otvoru upínače. Po vychladnutí nastane opětovné smrštění materiálu a tím vznikne dostatečně vysoká upínací síla [32]. Fáze upnutí stopky zobrazuje obrázek 2.6. Upínací pouzdro je určeno pouze pro daný typ nástroje, především co se týká délky a průměru stopky nástroje. Při uvolňování nástroje z držáku může dojít k jeho ohřátí a ke zvětšení jeho průměru. Z toho důvodu je nutné brát zřetel na rozdílnou tepelnou roztažnost upínače a nástroje. V případě vyšší teplotní roztažnosti nástroje může dojít k nedostatečnému zvětšení vnitřního průměru upínače a nelze tak vyjmout nástroj. Během vkládání nástroje tento problém nehrozí, neboť nástroj je studený.



Obr. 2.6 Fáze upnutí tepelným upínačem [33].

Pro dosažení teploty potřebné pro upnutí a odepnutí nástroje je dosaženo pomocí indukčního ohřevu. Průchodem střídavého proudu v cívce (tzv. induktor) o frekvenci 50 Hz nebo vyšší vzniká střídavé elektromagnetické pole. Pokud se v tomto poli nachází vodič (upínací pouzdro), v materiálu upínače tak vznikají indukované proudy, nazývané vířivé proudy. Tyto proudy vytvářejí teplo přímo v ohřívaném materiálu. Ohřev je velmi rychlý a je bez fyzického kontaktu mezi cívkou a upínačem. [32]



Obr. 2.7 Zařízení pro tepelné upínání Power Clamp Comfort NG o výkonu 13 KW [34].

Výhody tepelných upínačů:

- přesné upnutí
- vyváženost, možnost použití velmi vysokých otáček
- vysoká přesnost obvodového házení ($>0,003$ mm)
- rychlá výměna nástroje
- jednoduchá konstrukce
- velká upínací síla
- možnost použití prodlužovacích nástavců
- zcela bezúdržbové

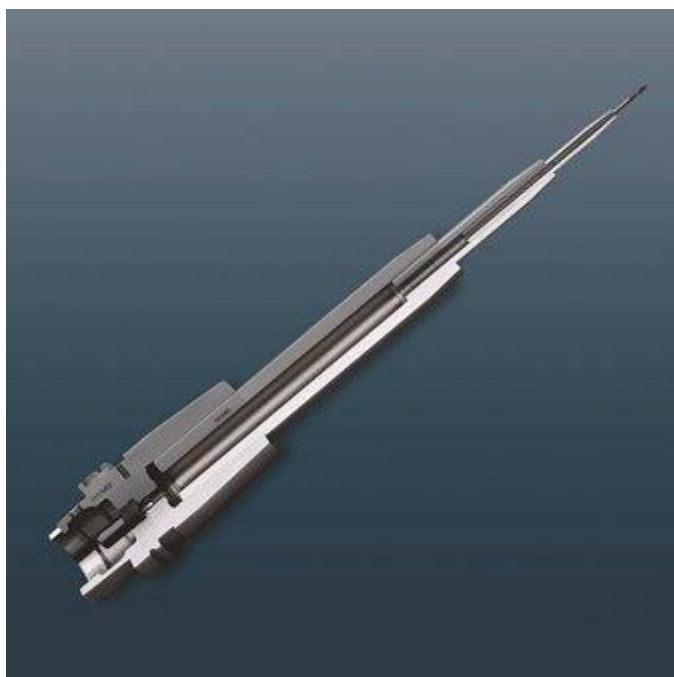
Nevýhody:

- je zapotřebí drahé zařízení pro ohřev nástroje
- nebezpečí vzniku popálenin v důsledku přítomnosti vysokých teplot
- při neodborném používání hrozí přehřátí držáku a nástroje
- dochází k tepelné roztažnosti i v axiálním směru, tím dochází ke změně celkové délky upínače
- při časté výměně nástroje nastává tepelná únava materiálu

Velkou předností tepelného upínače je možnost použití prodlužovacích nástavců, které umožňují obrábění i v těžko dostupných místech obrobku.



Obr. 2.8 Tepelný upínač HSK-A 63 s nástavcem [31].



Obr. 2.9 Použití několika prodloužení současně [32].

2.2.2 Polygonální upínací systém - TRIBOS

TRIBOS je patentovaný polygonální upínací systém pro válcové stopky nástroje firmy Schunk. Předností je opakovatelná přesnost a obvodová házivost s kvalitou vyvážení G 2,5 při $25\,000\text{ min}^{-1}$. I po více než tisíci upnutích zůstává obvodová házivost $>0,003\text{ mm}$ měřená ve vzdálenosti $2,5xD$, kdy D , je průměr nástroje [35]. Jsou vhodné pro všechny typy válcových stopek s tolerancí h6. Oproti tepelným upínačům má složitější konstrukci a stejně tak k upnutí a odepnutí nástroje je zapotřebí speciální externí zařízení. Pro oblast mikro-frézování je k dispozici TRIBOS-Mini (obrázek 2.10 a obrázek 2.11), který se vyznačuje tím, že jeho pomocí lze upnout nástroje již od průměru 0,3 mm. [36]



Obr. 2.10 Polygonální upínač TRIBOS-Mini od firmy Schunk [36].



Obr. 2.11 TRIBOS-Mini HSK-F 32 od frmy Schunk [36].

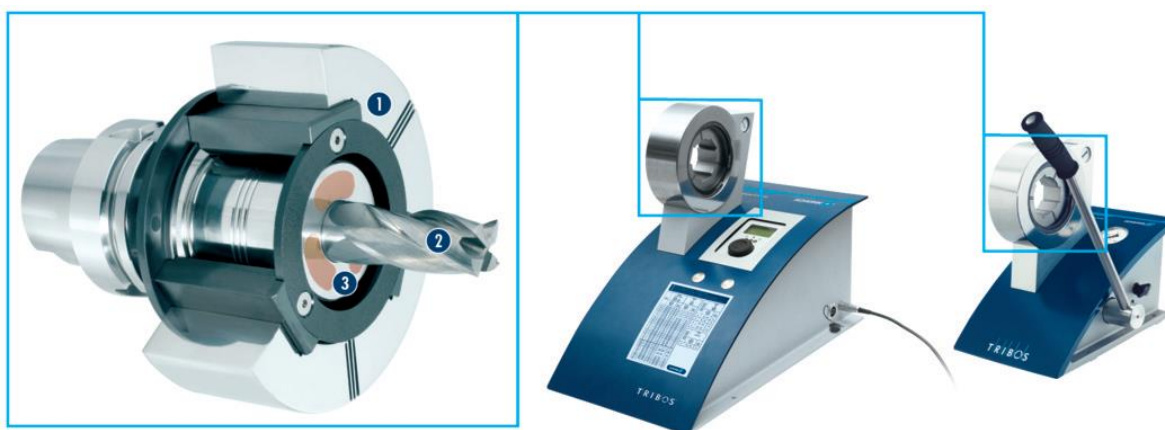
Princip upínače

Základem upínacího systému TRIBOS je polygonální tvar upínacího otvoru. Při působení sil na vnější stěny upínače dochází k elastické deformaci otvoru. Z polygonálního otvoru se tak dočasně stane otvor válcový a stopka nástroje může být poté vsunuta do otvoru. Po odstranění působící síly má otvor tendenci se vrátit do původního polygonálního tvaru a tím vzniká pevný svěrný spoj. Kontaktní plocha mezi stopkou a nástrojem je cca 90 % [37]. Během upínacího procesu dochází výhradně k deformaci v radiálním směru. Tudíž nenastává roztažení celkové délky upínače. Je to zásadní přednost oproti tepelným upínačům, kdy vlivem ohřevu a následném ochlazení dochází ke změně délky [35]. Obrázek 2.12 zobrazuje jednotlivé fáze upínání nástroje.



Obr. 2.12 Průběh upínání polygonálním upínače (podle [36]).

Pro vyvinutí síly, která umožní elastickou deformaci upínače a následné vložení nebo vyjmutí stopky nástroje, je zkonstruováno speciální zařízení pro upínače TRIBOS (obrázek 2.13). Princip spočívá ve stlačení hydraulické kapaliny pomocí ruční páky nebo hydraulického čerpadla na přesně stanovený tlak. Tím dochází k sevření čelistí a následné elastické deformaci vloženého upínače. Poté se do upínače vloží stopka nástroje a pomocí přepouštěcího ventilu dojde ke snížení tlaku a následnému uvolnění upínače. Výhodou zařízení na ruční pohon je zejména to, že není nutné mít externí zdroj energie.



Obr. 2.13 Upínací zařízení TRIBOS SVP [36].

Pozn. :

Při upínání je nutné dodržet správný tlak, který je doporučen výrobcem upínače. V případě nízkého tlaku nedojde k dostatečné deformaci a nelze vložit stopku nástroje. Pokud by tlak dosáhl příliš vysoké hodnoty, může dojít k trvalé (plastické) deformaci a následnému poškození upínače.

Výhody polygonálních upínačů [36, 38]:

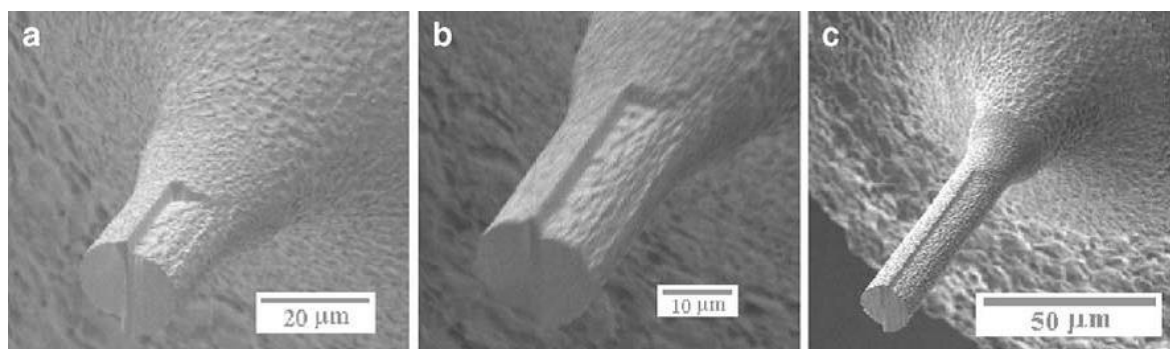
- dosažitelná obvodová házivost menší než 0,003 mm i po pakovaném upnutí
- rychlá výměna nástroje (cca 20 sekund)
- pro všechny válcové stopky s tolerancí h6
- zcela bezúdržbové
- vhodné pro velmi vysoké otáčky
- při upínání nedochází k axiální deformaci upínače

Nevýhody polygonálních upínačů [36, 38]:

- nutnosti dodržení správného tlaku pro daný upínač
- je zapotřebí drahé zařízení pro upnutí nástroje

2.3 Výroba mikro-fréz pomocí metody fokusovaného iontového svazku

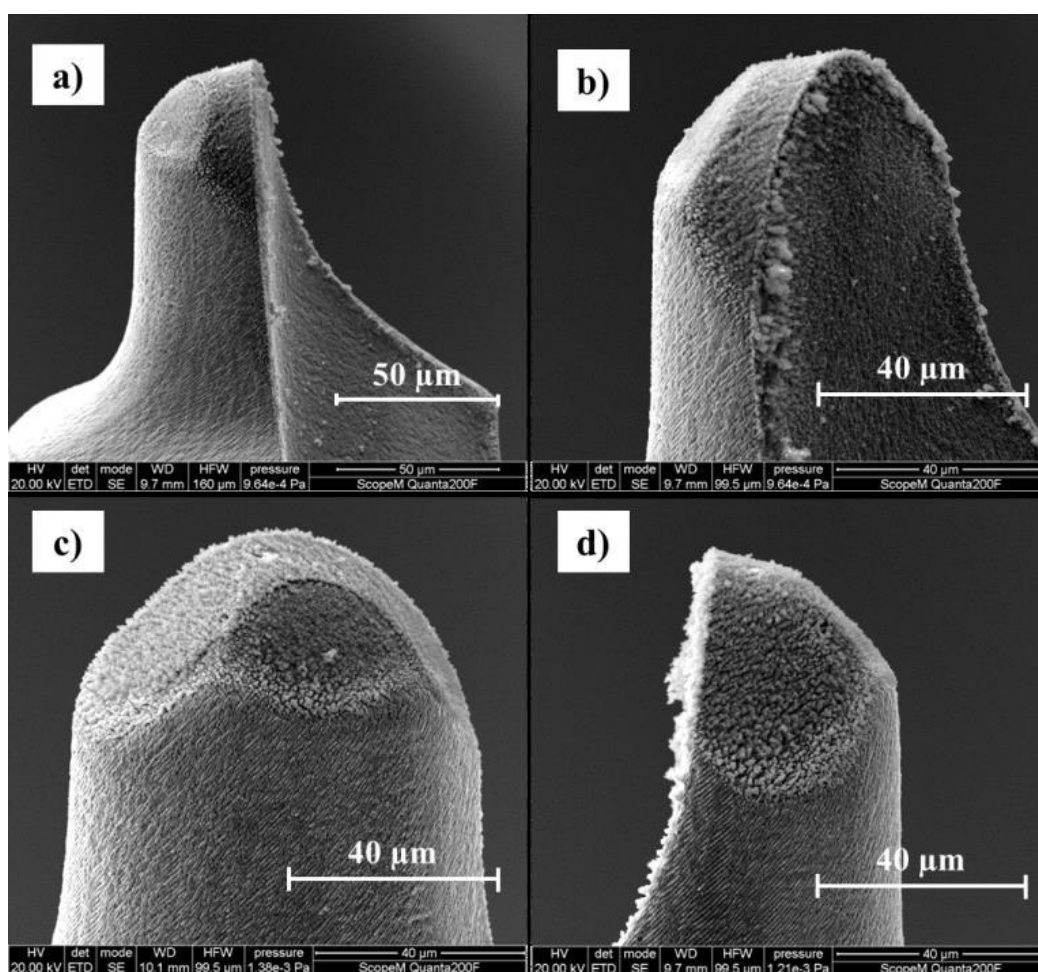
Moderní způsob výroby je metoda FIB (*Focused Ion Beam Method*), neboli metoda fokusovaného iontového svazku. Metoda FIB umožňuje vyrábět velmi přesné a malé nástroje a zároveň jej zobrazovat v mikrometrickém měřítku. Využití metody FIB lze nalézt v mnoha oblastech jako je např. optika, elektrotechnika a biomedicína. Dosažení požadovaného tvaru je docíleno za pomoci kinetické energie ionizovaných atomů vhodného prvku, jako je například galium (Ga). Tyto ionty získávají kinetickou energii v elektrickém poli a jsou přesně zaměřovány na místo, kde je zapotřebí odebrat materiál. Dopadající ionty způsobí vyražení atomů z obráběného materiálu a tím je docíleno požadovaného tvaru součásti. Je nezbytné, aby celý proces probíhal ve vakuu [50]. Při použití atomu gallia (Ga) a urychlovacím napětí 30 kV dosahuje rychlost částice přibližně $280 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Priorita použití Ga jako zdroj iontů, je převážně z důvodu jeho nízké teploty tání ($30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a pro vysokou jeho hmotnost částice ($1,2 \times 10^{-25} \text{ kg}$), což vede k rychlejšímu vymílání částic a umožňuje vyražet i atomy těžších prvků [51]. Velkou nevýhodou metody FIB je nízká produktivita a vysoká pořizovací cena zařízení pro tuto technologii. Obrázek 2.14 zobrazuje dvoubřité mikro-frézy o průměru $20 \text{ }\mu\text{m}$ a délce řezné části $20 \text{ }\mu\text{m}$, $25 \text{ }\mu\text{m}$ a $50 \text{ }\mu\text{m}$.



Obr. 2.14 Mikro-frézy vyrobené technologií FIB o průměru $20 \text{ }\mu\text{m}$ a délce a) $25 \text{ }\mu\text{m}$, b) $50 \text{ }\mu\text{m}$, c) $90 \text{ }\mu\text{m}$ [26].

2.4 Laserové obrábění mikro-nástrojů

Obrábění laserovou technologií poskytuje úběr materiálu vlivem tepelné energie. Laserový paprsek je zaměřen na přesné místo polotovaru, určeného pro výrobu řezného nástroje. Dojde k prudkému nárůstu teploty na povrchu materiálu a tím k jeho sublimaci. Lze tak odebírat materiál nezávisle na jeho tvrdosti. Paprsek je vysílán v pulzech, které mají velmi krátkou dobu trvání, v rozmezí od 10 ps – 100 fs . [23]



Obr. 2.15 Dvoubřítý mikro-frézovací nástroj zhotoven pomocí technologie laserového obrábění [23].

Ve srovnání s technologií FIB poskytuje laserové obrábění lepší strukturu povrchu a možnost vytvářet menší poloměr zaoblení ostří břitu nástroje (2 µm). Naproti tomu je zvýšené riziko tepelného ovlivnění materiálů a tím ke jeho změně vnitřní mikrostruktury [23].

Pozn. :

Současné výrobní technologie, jako např. metoda FIB, EDM nebo laserové obrábění dovolují výrobu nástrojů o průměru v řádu desítek mikrometrů. Při obrábění s nástroji těchto průměrů není možné dosáhnout optimální řezné rychlosti z důvodu omezení maximálních otáček vřetene.

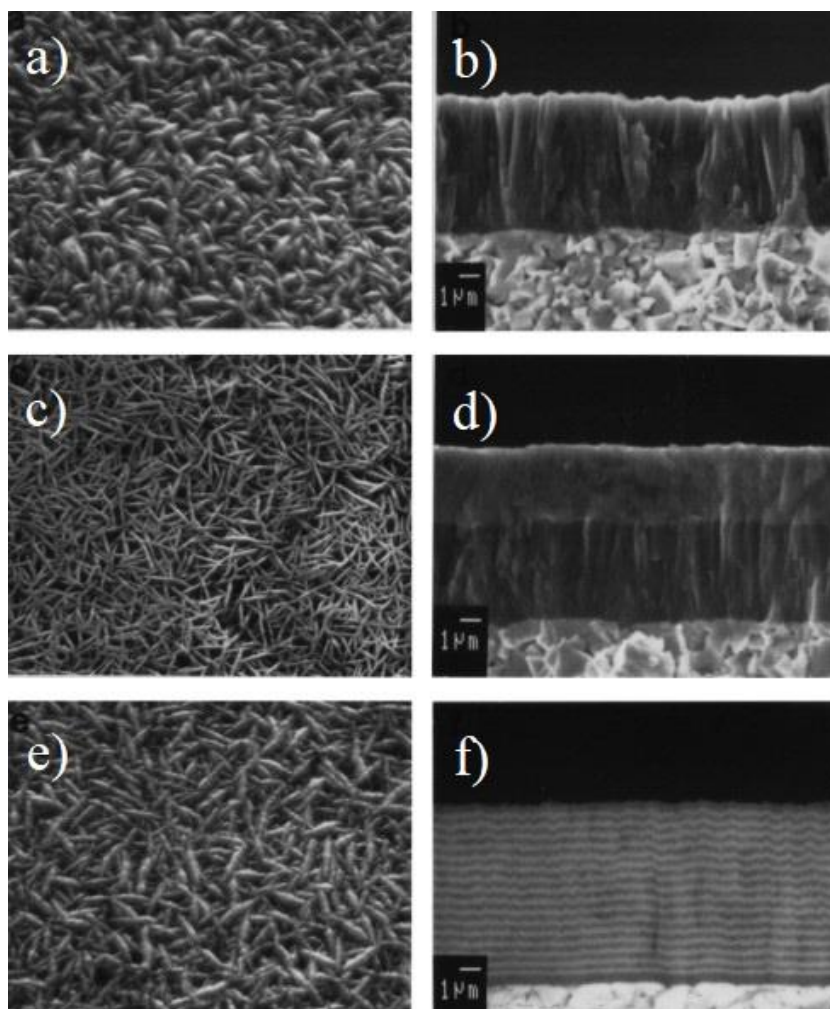
2.5 Povlakování řezných nástrojů

Dlouholetým trendem je snižování opotřebení nástrojů a tím prodloužení jejich životnosti. Cílem je zejména snaha o vyšší produktivitu, lepší kvalitu opracování obráběné plochy, vyšší přesnost a snížení výrobních nákladů. Povlakování zajišťuje zlepšení mechanických vlastností povrchu břitů nástroje a to především tvrdosti. Podstatou povlakování je nanesení na povrch nástroje materiál s vysokou tvrdostí. Mezi nejpoužívanější materiály se řadí nitrid titanu (TiN), karbid titanu (TiC), oxid hliníku (Al₂O₃) a karbonitrid titanu (TiCN) [1]. Současným cílem je nanášet povlaky z kubického nitridu bóru a to především pro jeho vysokou tvrdost přesahující 4000 HV a inertnost vůči ocelovým materiálům. [52]

Hlavní vývojový trend v oblasti povlakování směřuje k aplikaci kombinovaných vrstev a zjemňování jejich struktury. Kombinace vrstev jsou tzv. multivrstvy, kde se střídají alespoň dva druhy vrstev. Vzniká tak povlak, který svou tloušťkou stále nepřesahuje 4 μm, ale výrazně se liší jejich mechanické vlastnosti. Povlak se projevuje zvýšenou tvrdostí a současně vyšší houževnatostí. Specifickým druhem multivrstev jsou tzv. supermřížky, u kterých je tloušťka jedné vrstvy řádově několik nanometrů. Zlepšují se tak vazby mezi jednotlivými vrstvami, které poskytují celkové zvýšení kvality povlaku. [53]

Tradičními metodami povlakování je metoda **CVD** (Chemical Vapour Deposition) a **PVD** (Physical Vapour Deposition). Metoda CVD je chemické napařování, které probíhá za vysokých teplot (900-1200 °C). Ačkoliv tato metoda umožňuje povlakovat složitější tvary, není vhodná pro mikro-frézy z důvodu špatného povlakování ostrých hran a větší tloušťce povlaku (10-13 μm). Velká tloušťka povlaku způsobuje nárůst poloměru zaoblení ostří. Naproti tomu metoda PVD probíhá za podstatně nižších teplot (350-600 °C) a umožňuje povlakování ostrých hran. Tloušťka povlaku je zde přibližně 5 μm. [1]

Jakousi přechodovou technologií mezi CVD a PVD představuje metoda **MTCVD** (Medium Temperature Chemical Vapor Deposition). Technologie MTCVD umožňuje nanášet povlaky z plynné fáze za podstatně nižších teplot (700-850 °C), než je tomu u konvenční metody CVD, která je 900-1200 °C [54]. V důsledku nižší reakční teploty nedochází k poklesu houževnatosti základového slinutého karbidu. Břit nástroje tak vykazuje vyšší odolnost proti mechanickým rázům a může tak být použit při vyšších posuvových rychlostech. Vzhledem k vyšší houževnatosti materiálu nástroje lze také vyrobit břit s větším kladným úhlem čela a tedy s celkovým menším úhlem břitů bez snížené náchylnosti k vyламování ostří [55]. Nástroje povlakované technologií MTCVD získaly význam v obrábění šedé a tvárné litiny a nerezových ocelí [54]. Obrázek 2.16 zobrazuje snímky morfologie povlaků TiCN/ZrCN pořízené elektronovým mikroskopem (SEM).



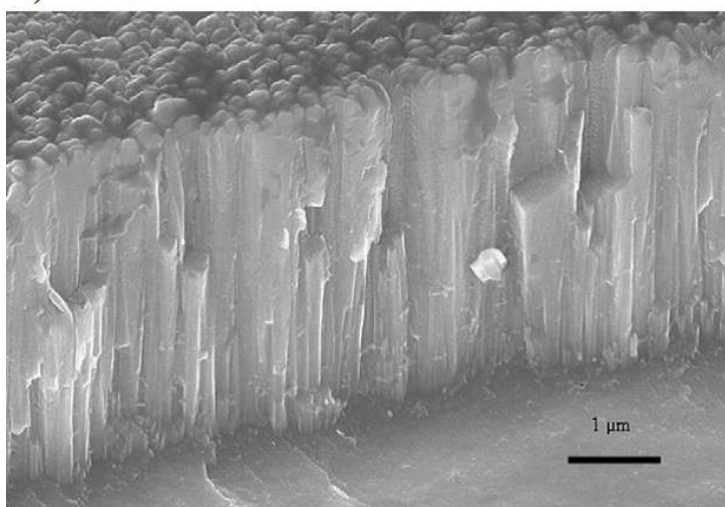
Obr. 2.16 Snímky z elektronového mikroskopu povlaků nanesené technologií MTCVD, a) monovrstva povlaku TiCN, b) lomový povrch povlaku TiCN, c) dvouvrstvý povlak TiCN/ZrCN, d) lomový povrch povlaku TiCN/ZrCN, e) a f) multivrstvý povlak TiCN/ZrCN [54].

HIPIMS

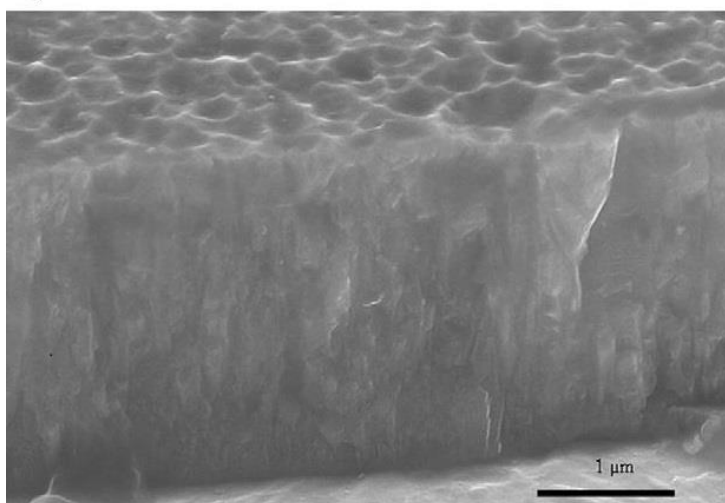
Jednou z vhodných technologií pro povlakování mikro-fréz je metoda **HIPIMS** (High Power Impulse Magnetron Sputtering) neboli vysokovýkonové pulzní magnetronové naprašování. HIPIMS představuje relativně novou technologii povlakování, která je založena na principu PVD. Povlak je vytvořen pomocí magnetronového naprašování s kombinací s pulzní energií. Magnetron je speciální elektronická součást, které je schopna generovat elektromagnetické záření v oblasti mikrovln. Magnetron je ve velké míře využíván jako energetický zdroj v mikrovlnných troubách. Konstrukce magnetronu se skládá z vakuové trubice, ve které se nachází kovový váleček sloužící jako katoda. Anoda je tvořena kovovým blokem s členitou strukturou vytvářející sudý počet štěrbin. Trubice je obklopena chladicími prvky, jako jsou například hliníková žebra. Celou trubici pak obklopují dva silné permanentní magnety. [56]

Cílem technologie HIPIMS je vytvořit plazma s vysokým podílem ionizovaných atomů tvořící povlak. Díky vyšší hustotě plazmatu je potřebná ionizační vzdálenost nižší. Vyšší hustoty je docíleno zvýšením elektrické energie ($500\text{--}2000\text{ W.cm}^{-2}$). Výsledný povlak má rovněž větší hustotu a celková tloušťka filmu je velmi malá, přibližně $2\text{ }\mu\text{m}$. Obrázek 2.17 zobrazuje mikrostrukturu povlaku TiAlN nanášeného běžnou metodou naprašování ve srovnání s technologií pulzního naprašování. Je zřejmé, že hustota povlaku je vyšší a mění se morfologická struktura. Povlak nanášený běžným naprašováním je více pórovitý a „sloupovitý“. Naproti tomu nanášení pulzním naprašováním poskytuje povlak, který je více celistvý. Další výhodou povlaků nanášené touto technologií je díky vyšší hustotě lepší odolnost proti opotřebení. [57, 58]

a)



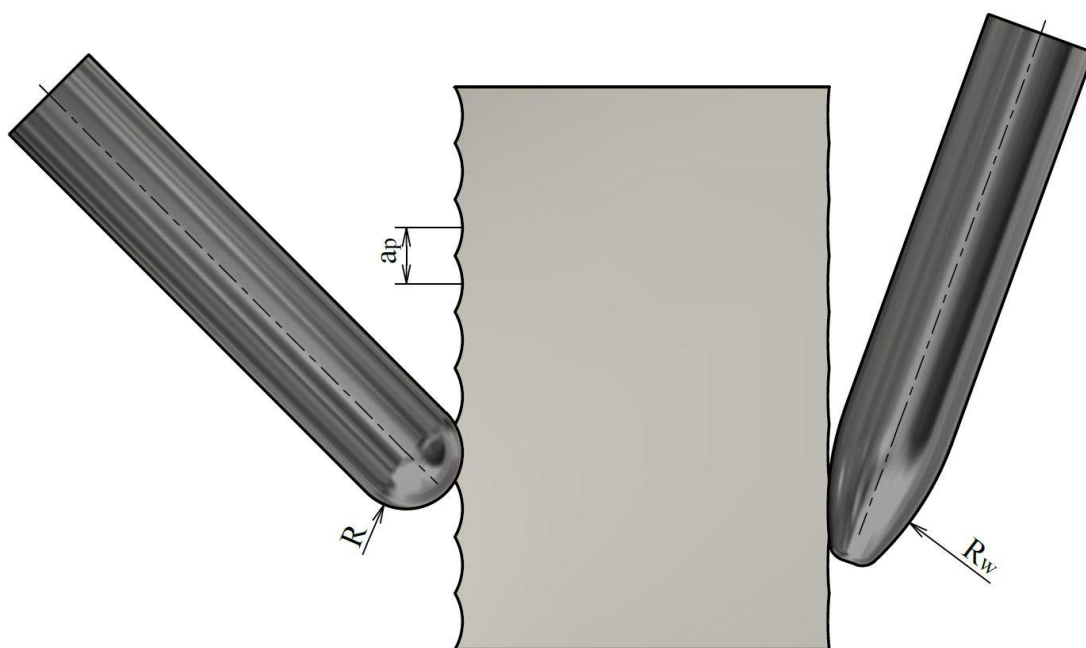
b)



Obr. 2.17 Srovnání povlaků TiAlN nanášeného a) běžnou metodou naprašováním, b) pulzním naprašováním [59].

2.6 Dokončovací strategie frézování s použitím nástrojů částečného tvaru kulové plochy

Při frézování štíhlých součástí nastává problém, kdy vřeteno zasahuje do materiálu obrobku a nástroj se tak nemůže dostat do všech míst. Použití dlouhých, štíhlých nástrojů je omezené z důvodu nízké tuhosti, což vede k úhlovému vychýlení nástroje od osy otáčení vlivem řezných sil. Aplikace 5osých frézovacích strojů umožňuje natočení obrobku, čímž je umožněno obrábění v těžko dostupných místech. Standardně je pro tento způsob použita kulová dokončovací fréza. Výsledná kvalita obrobeného povrchu se odvíjí zejména od poloměru nástroje a kroku nástroje. Pro kulovou frézu je tak nutno použít malý krok, aby bylo dosaženo optimální struktury povrchu. Vzhledem k požadavkům na vysokou produktivitu stroje snižování kroku nástroje není vhodnou metodou ke zlepšení struktury povrchu. Vhodnou alternativou je vytvoření nástroje s částečným tvarem kružnice jako např. tvar soudečkový nebo čočkový. Mezi nástrojem a obrobkem tak vznikne několikanásobně větší styková plocha, čímž lze použít větší krok frézy při zachování stejné drsnosti povrchu. [39, 40]



Obr. 2.18 Srovnání povrchu vytvořeného kulovou frézou (vlevo) a frézou s částečným tvarem kulové plochy (vpravo).

Pro nástroj s částečným tvarem kružnice je udávána hodnota tzv. efektivního poloměru nástroje R_w , která značí poloměr řezné části nástroje primárně určené k obrábění. Obrázek 2.19 zobrazuje graf závislosti drsnosti povrchu na velikosti kroku frézy při obrábění kulovou frézou a frézou s částečným tvarem kružnice.

Vztahy pro výpočet teoretické drsnosti R_z při obrábění kulovou frézou vychází právě z geometrických poznatků a jsou ve tvaru:

Vztah pro teoretickou drsnost R_z ve směru posuvu nástroje (podélná drsnost):

$$R_z = \frac{f_z^2}{8 \cdot R \cdot 1000} \quad (3.1)$$

Kde: R_z - výška maximální nerovnosti profilu [μm]

f_z - posuv na zub [mm]

R - poloměr frézy [mm]

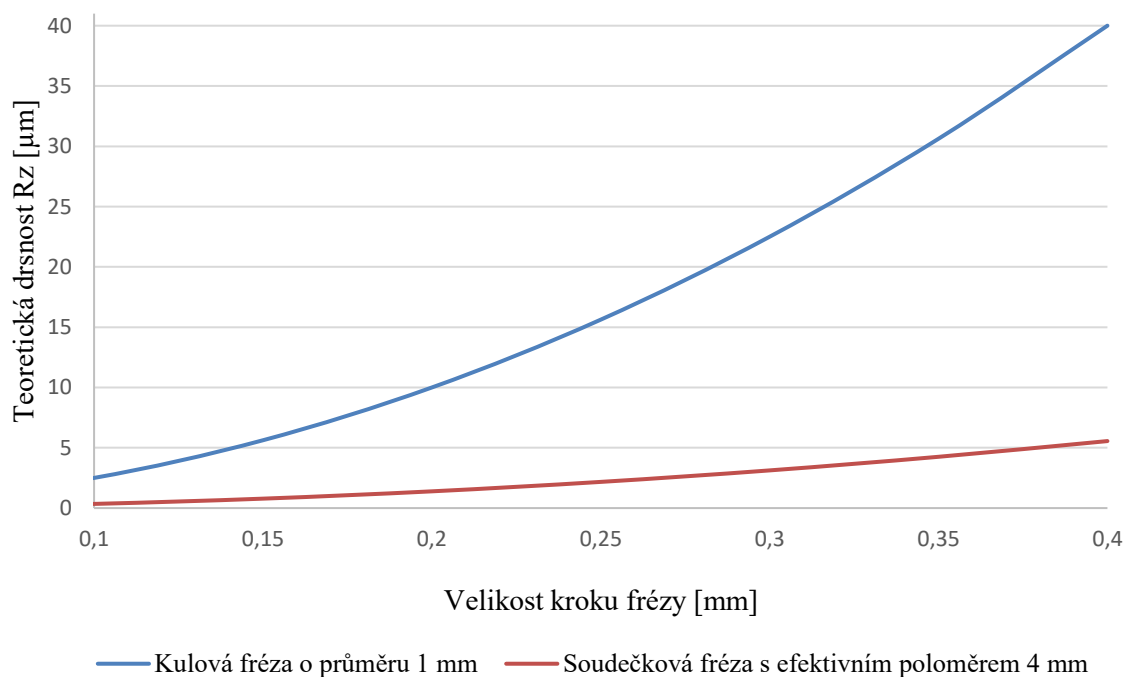
Vztah pro teoretickou drsnost R_z ve směru kolmém na směr posuvu nástroje (podélná drsnost):

$$R_z = \frac{a_p^2}{8 \cdot R \cdot 1000} \quad (3.2)$$

Kde: R_z - výška maximální nerovnosti profilu [μm]

a_p - krok frézy [mm]

R - poloměr frézy [mm]



Obr. 2.19 Graf závislosti teoretické drsnosti na kroku frézy.

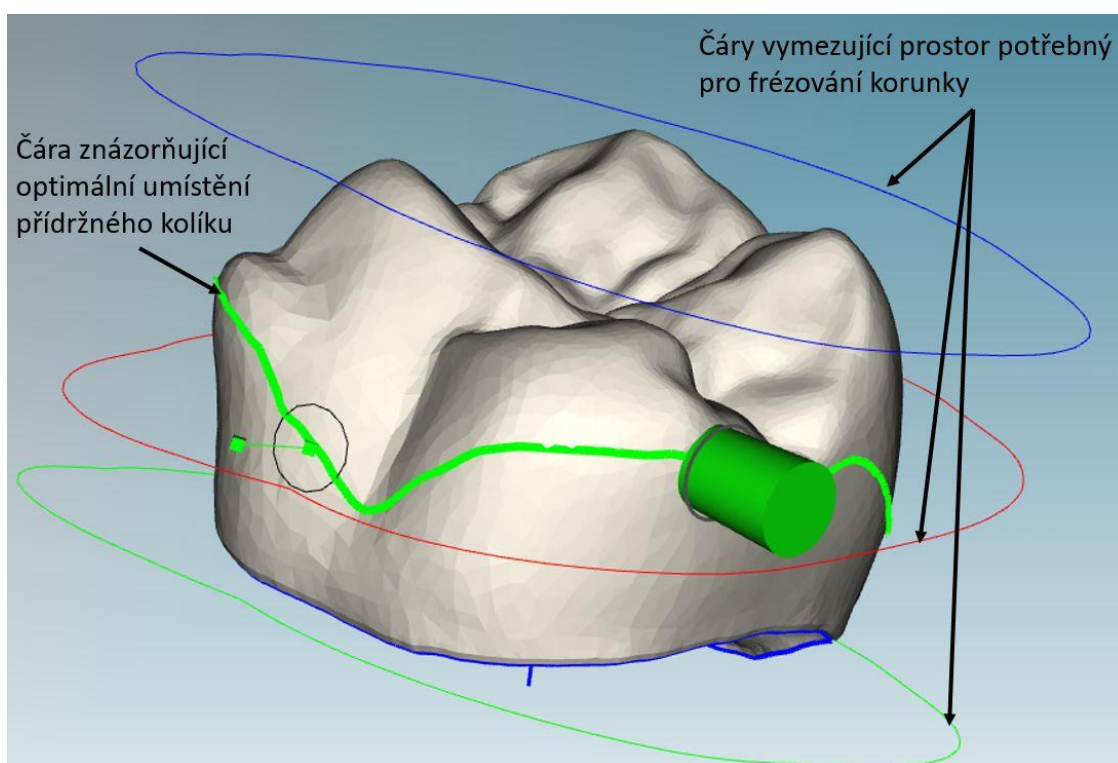
2.7 CAM Software HyperDENT

HyperDENT je přední světový softwarový CAM systém od Firmy FOLLOW-ME speciálně vyvinutý pro výrobu zubních náhrad a jiných dentálních dílů. Systém je kompatibilní s mnoha frézovacími stroji. HyperDENT je automatizovaný programovací proces. Po načtení souboru přímo z dentálního CADu je zvolen polotovaz, kotvící piny pro uchycení v polotovaru. Po vybrání vhodné šablony pro frézovací strategii pracuje systém samostatně až po vygenerování výsledného NC souboru. [41, 42]

Systém se zaměřuje na různé segmenty dentálního trhu od malých dentálních laboratoří až po vysoce výrobní laboratoře. Firma FOLLOW-ME nabízí na trhu několik verzí tohoto softwaru. HyperDENT-Compact je navržen pro použití v malých zubních laboratořích. Zjednodušené uživatelské rozhraní a vyšší stupeň automatizace je vhodný pro méně zkušené uživatele. HyperDENT-Classic byl vyvinut pro pokročilé uživatele a disponuje všemi funkcemi, které jsou obsaženy ve verzi HyperDENT-Compact. Systém obsahuje modul pro generování a modifikaci šablon pro strategii frézování. Uživatel disponuje možností volby vlastních parametrů obrábění a ojedinělé dráhy nástroje. Umožňuje tak výrobu všech typů součástí. [41, 42]

Ve všech verzích softwaru je zahrnuto několik základních funkcí, které usnadňují a urychlují vytvoření výrobního programu. Patří mezi ně:

- automatický výběr polotovaru
- automatické vybrání polotovaru a umístění přídržného kolíku (obrázek 2.20)
- vytvoření konektorů a spojovacího profilu rámu mezi jednotlivými díly
- automatické natočení dílů pro optimalizaci procesu
- gravírování a identifikace jednotlivých dílů



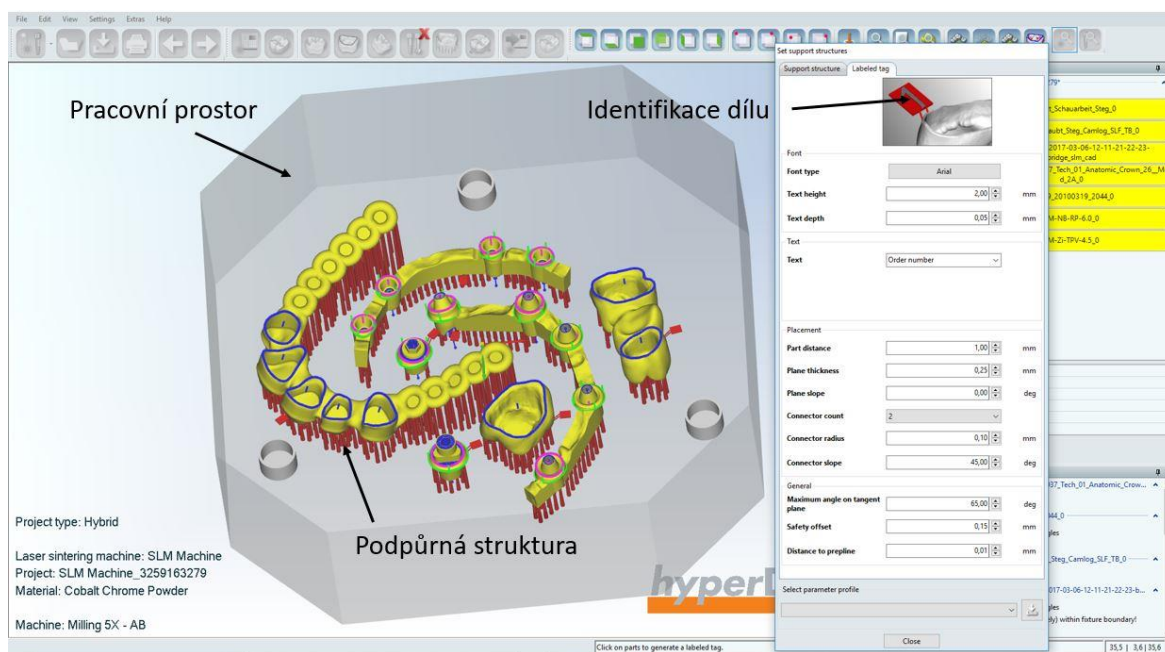
Obr. 2.20 Optimální umístění přídržného kolíku (zelená čára) [43].

2.7.1 Hybrid modul

Inovativní možnost výroby poskytuje Hybrid modul. Hybridní výroba spojuje aditivní technologii (3D tisk) s technologií třískového obrábění. Zahrnuje technologie laserového navařování titanových a chrom-kobaltových slitin, které jsou poté přeneseny do frézovacího stroje pro dokončení výroby implantátů [41].

Nejvhodnější technologií pro 3D tisk kovu je tzv. laserové sintrování DLMS (*Direct Laser Metal Sintering*), nebo obdobná SLM (*Selective Laser Melting*). Jedná se o metodu 3D tisku, kdy je kovový prášek postupně nanášen v tenkých vrstvách a spékán laserovým paprskem o výkonu 200–400 W. V místě dopadu paprsku dochází k lokálnímu natavení kovového prášku a podkladové vrstvy. V krátkém čase dochází ke ztuhnutí roztaveného kovu a k vytvoření pevného spoje. Pro fixaci a správné polohy dílu je v průběhu procesu nutná výstavba podpůrné struktury, která je tvořena ze stejného materiálu. Tloušťka vrstev se pohybuje v rozmezí 0,02–0,04 mm a maximální velikost zrna prášku je 16 μm . Pro zamezení oxidace je pracovní komora vyplněna inertním plynem. V případě aplikace titanového prášku je pro vytvoření ochranné atmosféry použit argon. Hlavním rozdílem mezi DLMS a SLM je, že při technologii SLM nastává úplném roztavení každé vrstvy, naproti tomu u metody DLMS dochází ke slinování (spékání) vrstvy kovového prášku. [41, 44, 45]

Modul Hybrid v softwaru HYPERDent disponuje funkcí vytvoření programu pro aditivní technologii i pro funkci CNC obrábění. Po vybrání typu aditivní technologie (nejčastěji SLM) systém přiřadí hranice (rozměry) pracovního prostoru, kde jsou následně umístěny CAD modely zubních náhrad a korunek. CAD modely bývají obvykle ve formátu stl. Další funkcí je vytvoření podpůrné struktury, která zajišťuje fixaci a optimální polohu dílu. Povrch takto zhotovených implantátů má nekvalitní strukturu ($Ra\ 12,7\text{--}25\ \mu\text{m}$) [46]. Některé funkční plochy, jako jsou například dosedací plochy nebo závitové části, je nutné dále opracovat. Modul Hybrid zároveň poskytuje možnost vytvoření CAM programu pro dokončení zubního implantátu. Po zvolení ploch, které je nezbytné dodatečně opracovat, je vybrána vhodná strategie pro vygenerování NC souboru. [41]



Obr. 2.21 Prostředí softwaru HyperDENT, modul Hybrid [41].



Obr. 2.22 Zubní korunky zhotovené SLM (*Selective Laser Melting*) [47].

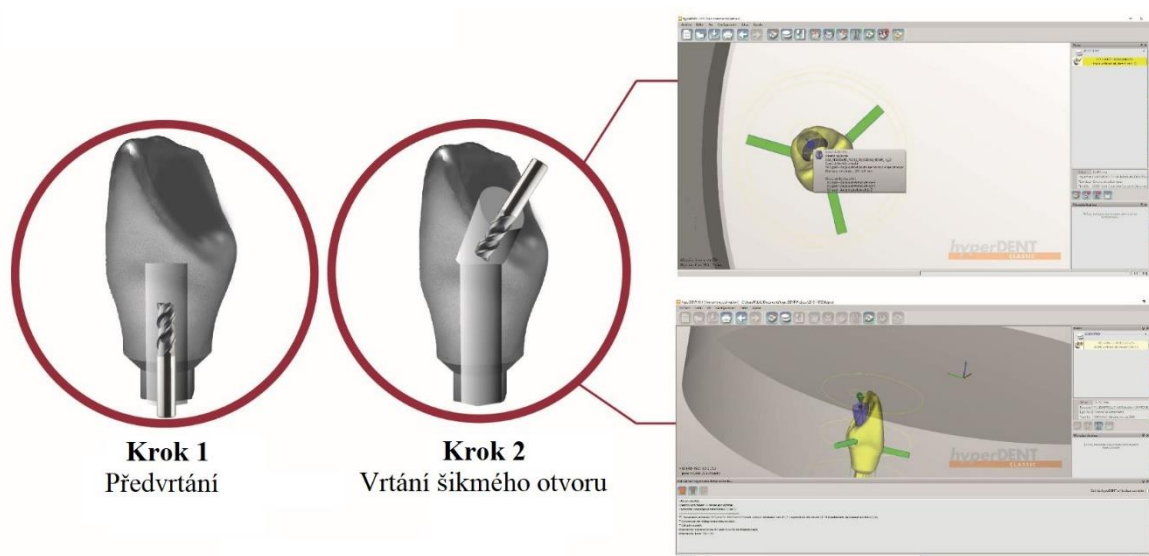
2.7.2 Modul pro výrobu šikmých kanálků v zubních náhradách „*Anglulated Screw Channel Module*“

Vytvoření šikmého kanálku v zubní korunce je nezbytné pro angulované zubní náhrady. Pojmem angulovaná zubní náhrada je označována zubní náhrada, jejíž kanálek, kterým se umísťuje a dotahuje šroub pro uchycení korunky, není rovnoběžný s osou náhrady kořene zubu (obrázek 2.23). Tyto náhrady umožňují zubním lékařům umístit implantát do ideální polohy, což v minulosti nebylo možné. [48]



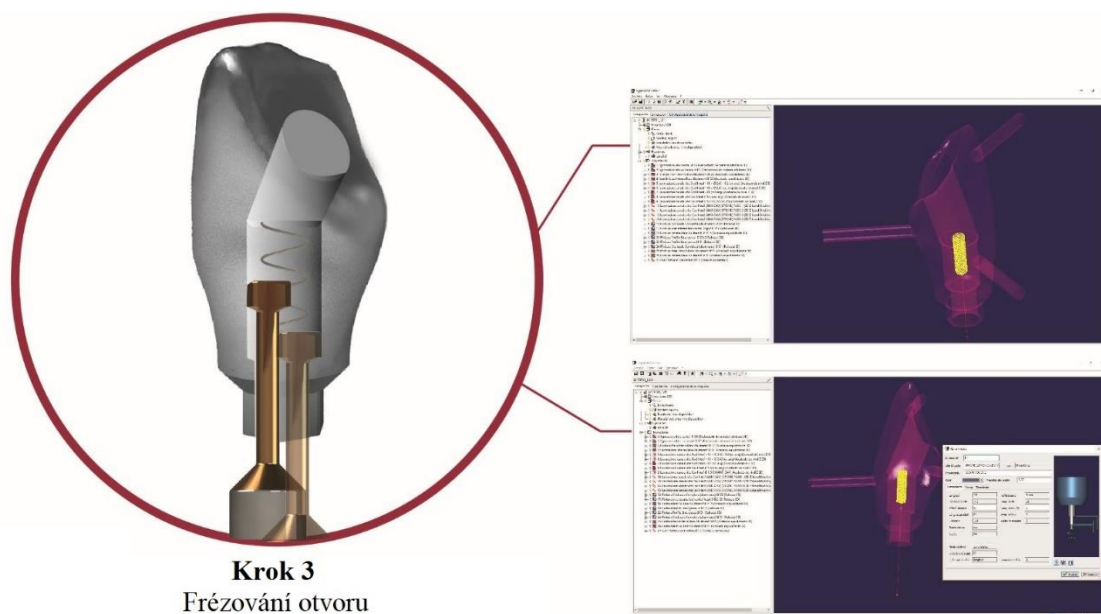
Obr. 2.23 Angulovaná zubní náhrada [49].

Součástí softwaru hyperDENT je modul **ASC** (*Anglulated Screw Channel Module*) přímo určený pro výrobu šikmých kanálků. Modul ASC poskytuje možnost vytvořit kanálek pro přístup ke šroubu v úhlu až 30 stupňů. Prvním krokem pro vytvoření otvoru (předvrtání) ve spodní části korunky do požadované hloubky (Obrázek 2.24, krok 1). Následuje vrtání otvoru, které umožňuje vložení šroubu pro uchycení korunky ke kořenu zubní náhrady (Obrázek 2.24, krok 2). Osy těchto otvorů leží v jedné rovině a svírají mezi sebou požadovaný úhel (0–30 °) [48].



Obr. 2.24 Fáze vrtání zubní korunky [48].

Další fází je frézování předvrtaného otvoru v dolní části korunky. Pro pevné uchycení pomocí šroubu je nutné vytvořit ve spodní části otvoru vnitřní osazení, tzv. sedlo (obrázek 2.25, krok 3). Pro vytvoření takového otvoru je použit nástroj, který je na svém konci rozšířen. K této aplikaci je vytvořen speciální nástroj DMTONE. Pohyb nástroje je veden po spirálovité křivce. Modul ASC v softwaru HyperDENT je přímo navržen pro tento způsob frézování. [48]



Obr. 2.25 Fáze frézování otvoru s vnitřním osazením [48].

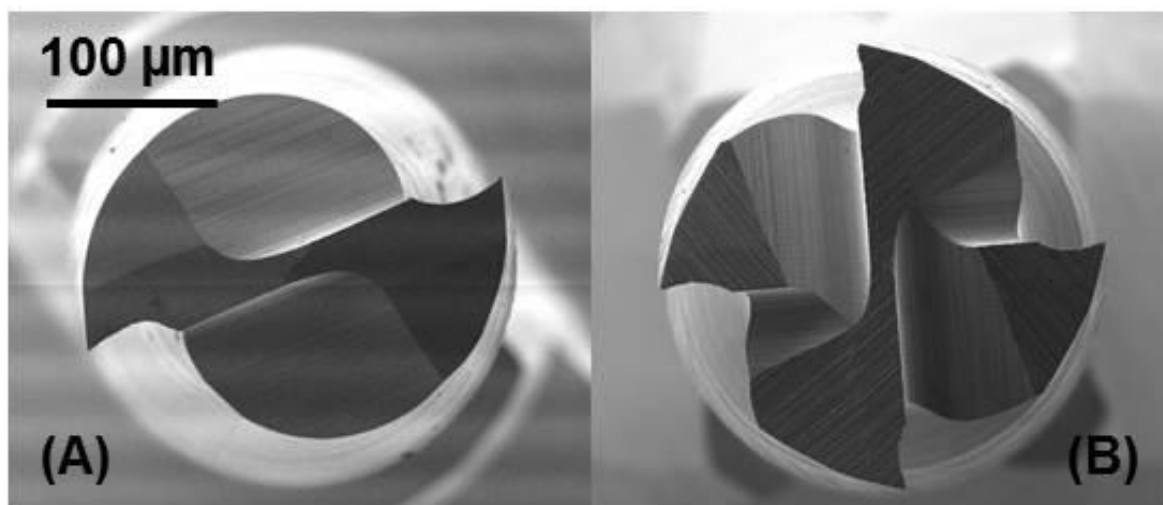
3 VÝZKUMNÉ TRENDY V OBLASTI MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

Mikro-frézování se stává obtížné při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, které jsou ale v technické praxi často využívány. Příkladem takového materiálu je titanová slitina Ti6Al4V, která poskytuje vysoký poměr mezi pevností a hmotností (měrná hmotnost $4,4 \text{ g.cm}^{-3}$ a mez pevnosti cca 786 MPa [60]). K moderním technologiím výroby Ti6Al4V patří prášková metalurgie s použitím aditivní výroby např. tavení elektronovým paprskem (EBM) nebo laserovým sintiřováním (DMLS) [24].

Určení správné geometrie nástroje a optimálních řezných podmínek pro mikro-frézování je problematické a nemusí dosahovat stejných výsledků, jako při makro-frézování. Velkým problémem je vznik velikostního efektu nebo tvorba otřepů. Vzhledem k tomu, že průměry mikro-nástrojů jsou velmi malé, je stanovení velikosti opotřebení velmi problematické.

3.1 Vliv geometrie nástroje na průběh řezného procesu

Použití optimální geometrie nástroje u skutečného mikro-obrábění je problematické a nemusí vždy odpovídat teoretickým předpokladům, nebo geometrii vhodné pro konvenční frézování. Tato studie byla zaměřena na vliv použití dvoubřité a čtyřbřité frézy na celkový průběh řezného procesu. Experiment byl prováděn na titanové slitině Ti6Al4V vyrobenou aditivní technologií. Jako nástroj byla vybrána dvoubřítá (obrázek 3.1a) čtyřbřítá fréza (obrázek 3.1b) o shodném průměru 0,3 mm. Hloubka řezu byla konstantní ($30 \text{ }\mu\text{m}$) a délka frézované drážky 25 mm. Proměnnými parametry byla řezná rychlost v_c [m.min^{-1}] a posuv na zub f_z [μm]. Řezná rychlost pro dvoubřitou frézu byla zvolena 63 m.min^{-1} a 149 m.min^{-1} , pro čtyřbřitou frézu 58 m.min^{-1} a 154 m.min^{-1} . Pro velikosti posuvu na jeden zub frézy byly postupně použity 4 úrovně ($0,1 \text{ }\mu\text{m}$, $0,5 \text{ }\mu\text{m}$, $1,5 \text{ }\mu\text{m}$ a $3 \text{ }\mu\text{m}$). Experiment byl prováděn na 5osém mikro-obráběcím stroji Micromaster Kugler TM. Stroj disponuje dvěma vřeteny, s mechanickým ložiskem (maximální otáčky $60\,000 \text{ min}^{-1}$) a se vzduchovým ložiskem (maximální otáčky $180\,000 \text{ min}^{-1}$). [24]



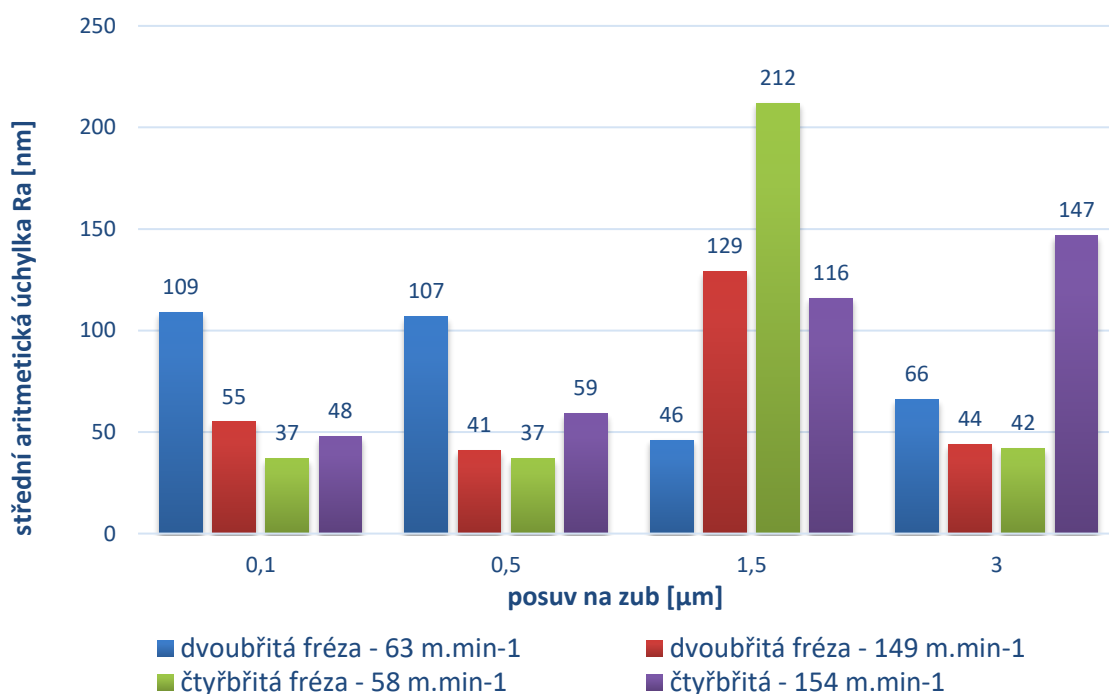
Obr. 3.1 Snímek z elektronového mikroskopu a) dvoubřítá mikro-fréza, b) čtyřbřítá mikro-fréza [24].

3.1.1 Vliv geometrie na strukturu povrchu

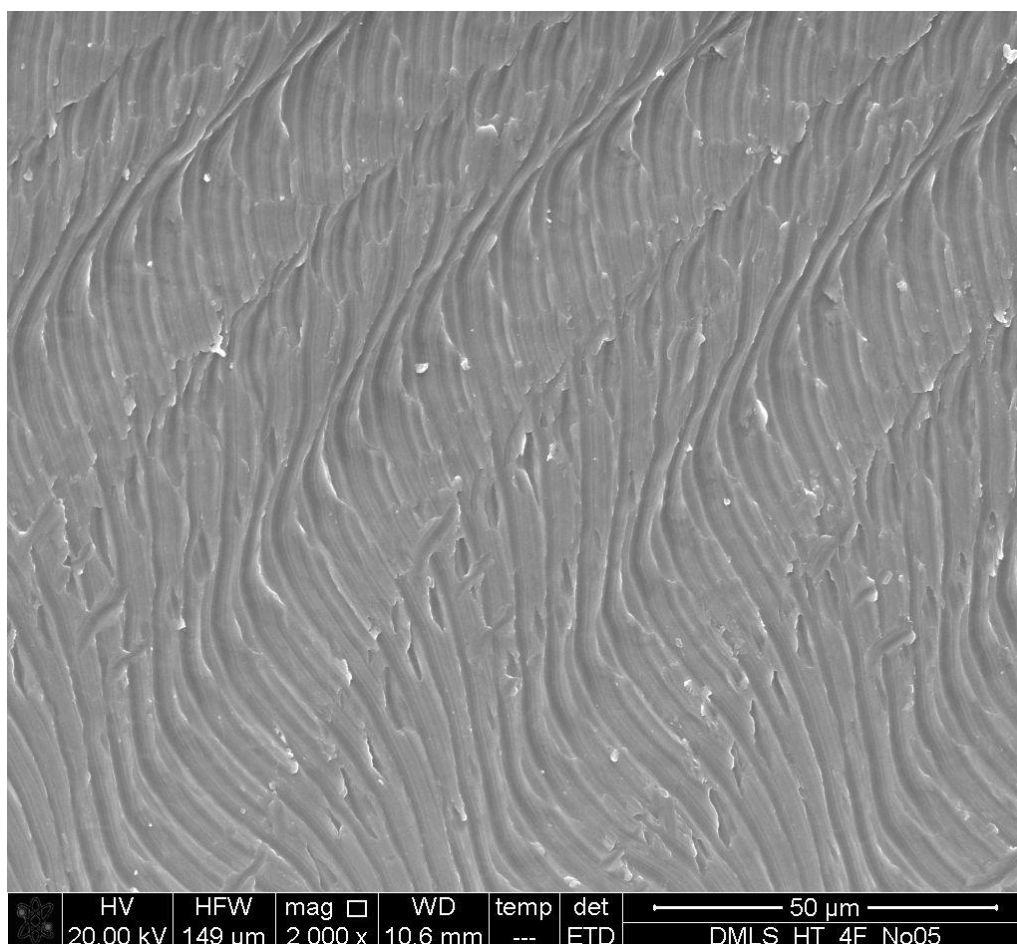
V tabulce 3.1 jsou uvedeny naměřené hodnoty struktury povrchu s použitím dvou odlišných nástrojů při použití různých řezných rychlostech a velikostech posuvu. Při porovnání výsledků měření lze vyvodit závěr, že dvoubřité frézy vykazují lepší strukturu povrchu při vyšších řezných rychlostech (obrázek 3.2). Zvýšená hodnota struktury povrchu při použití nízké velikosti posuvu je způsobena plastickou deformací vlivem nedostatečné tloušťky třísky a vznikem tzv. velikostního efektu [6]. Výsledná struktura při obrábění nástrojem se čtyřmi břity je ovlivněna více velikostí posuvu než řeznou rychlostí. Při pozorování snímků z elektronového mikroskopu (obrázek 3.3) lze pozorovat, že během obrábění čtyřbřitou frézou při řezné rychlosti $58 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a velikosti posuvu $1,5 \mu\text{m}$ byl povrch silně poškozen vlivem vibrací nástroje. [24]

Tabulka 3.1 Naměřené hodnoty střední aritmetické úchlky R_a (podle [24]).

	Střední aritmetická úchylka Ra [nm]			
Typ nástroje	Dvoubřítá fréza		Čtyřbřítá fréza	
Posuv na zub [μm]	63 [m.min ⁻¹]	149 [m.min ⁻¹]	58 [m.min ⁻¹]	154 [m.min ⁻¹]
0,1	109	107	46	66
0,5	55	41	129	44
1,5	37	37	212	42
3,0	48	59	116	147



Obr. 3.2 Graf závislosti střední aritmetické úchlky R_a na řezných podmínkách (podle [24]).



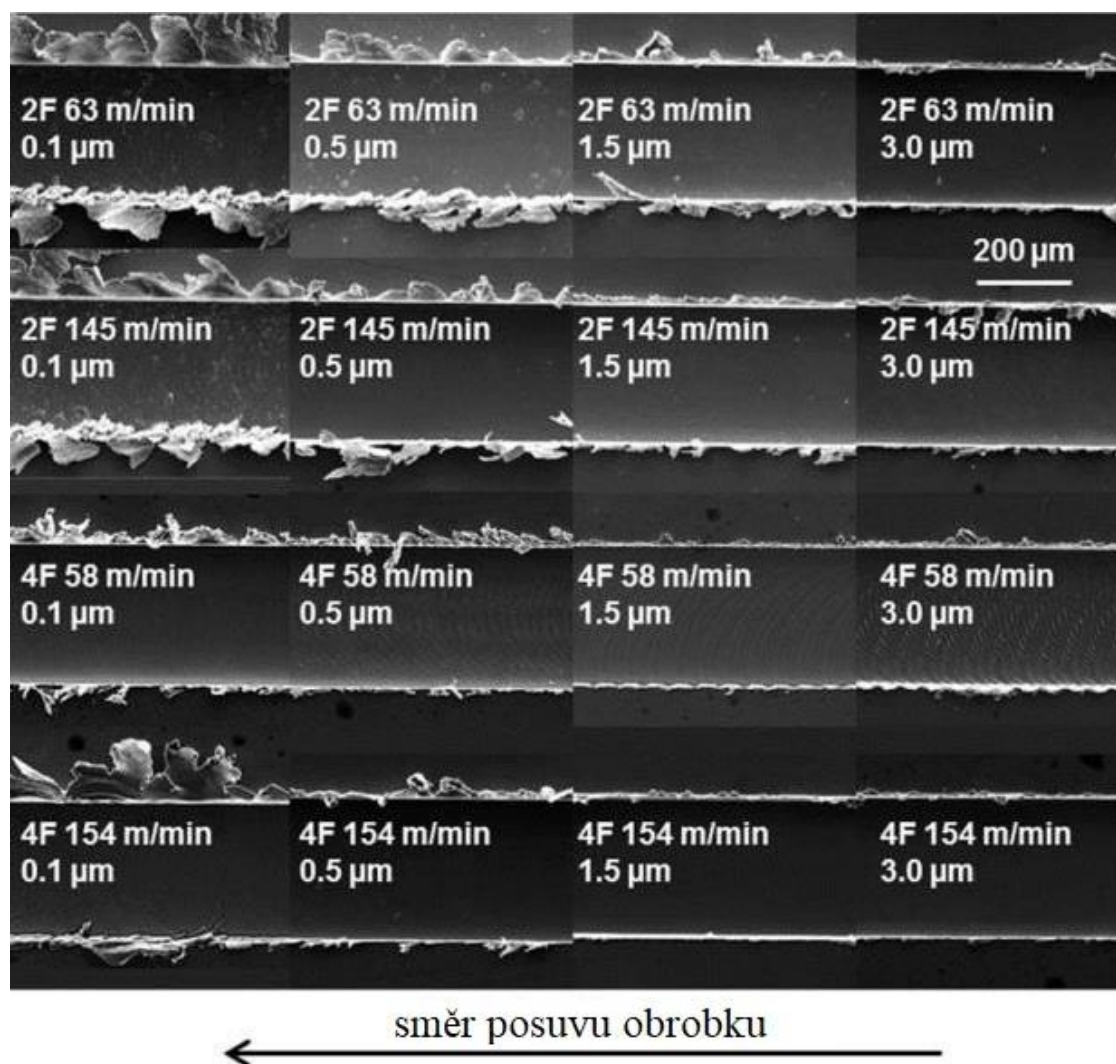
Obr. 3.3 Snímek z elektronového mikroskopu povrchu obráběného čtyřbřitou frézou, řezná rychlost $v_c = 58 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 1,5 \text{ μm}$ [24].

3.1.2 Analýza tvorby otřepů

Otřepy představují nežádoucí výčnělky během řezného procesu v důsledku pasivního zatížení a mohou negativně ovlivnit požadované vlastnosti součástí. Při mikro-frézování je tvorba otřepů jedním z hlavních omezujících faktorů přesnosti, protože jejich rozměry jsou srovnatelné s rozměry obráběné geometrie [61]. Tvorba otřepů byla analyzována pomocí snímků z elektronového mikroskopu (SEM) [24]. Obrázek 3.4 zobrazuje snímky frézované drážky pro použití dvoubřité a čtyřbřité frézy za použití odlišných řezných podmínek.

Uvedené snímky ukazují, že významný vliv na velikost a tvar otřepů je velikost posuvu na zub. Při použití posuvu na zub $1,5 \text{ μm}$ a $3,0 \text{ μm}$ je velikost otřepu výrazně menší, než u posuvu $0,1 \text{ μm}$ a $0,5 \text{ μm}$. Tento jev je způsoben nárazy materiálu obrobku na břit nástroje, lepší úběr materiál a menší plastickou deformaci, což má za následek minimalizaci bez ohledu na použitou geometrii nástroje. Vliv řezné rychlosti se ukázal jako méně ovlivňující faktor. Rozdíly ve velikost a množství otřepů při použití dvoubřité a čtyřbřité frézy lze pozorovat převážně u frézování čtyřbřitou frézou, kdy dosahovaly

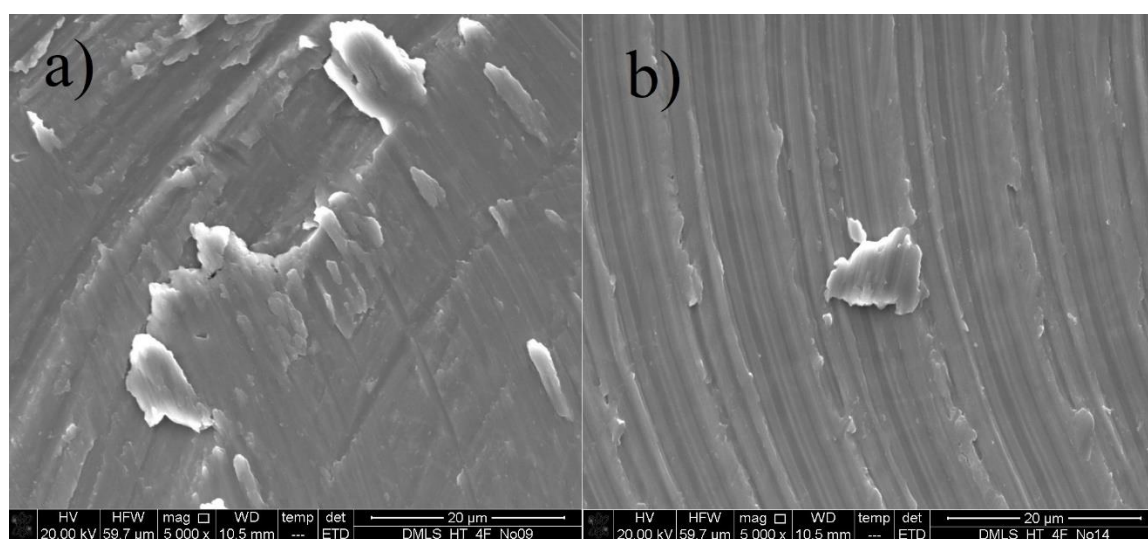
menších hodnot a to zejména u nejnižších hodnot posuvu. Celkově lze čtyřbřitou frézu klasifikovat jako vhodnější z hlediska tvorby otřepů [24].



Obr. 3.4 Analýza tvorby otřepů pomocí snímku SEM (2F: dvoubřitá fréza, 4F: čtyřbřitá fréza) [24].

3.1.3 Povrchové vady

Povrchové defekty na obrobku při použití dvoubřité a čtyřbřité frézy jsou srovnatelné. Pro nižší hodnoty posuvu převládají vady v důsledku plastické deformace a částečným vznikem velikostního efektu (obrázek 3.5a). Při zvyšování velikosti posuvu (při 1,5–3,0 μm) lze nalézt úlomky třísek, které jsou rozetřeny po povrchu obráběné plochy (obrázek 3.5b). [24]

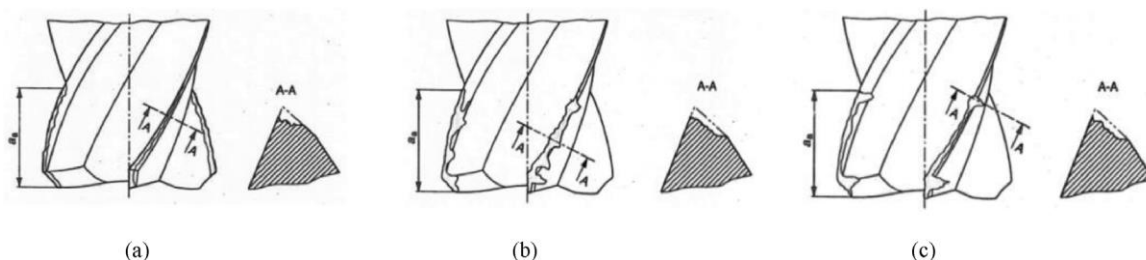


Obr. 3.5 Vzniklé defekty na povrchu obrobené plochy při obrábění čtyřbřitou frézou a) $v_c = 154 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, b) $v_c = 154 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv na zub $f_z = 3,0 \text{ } \mu\text{m}$ (podle [24]).

3.2 Měření opotřebení nástrojů

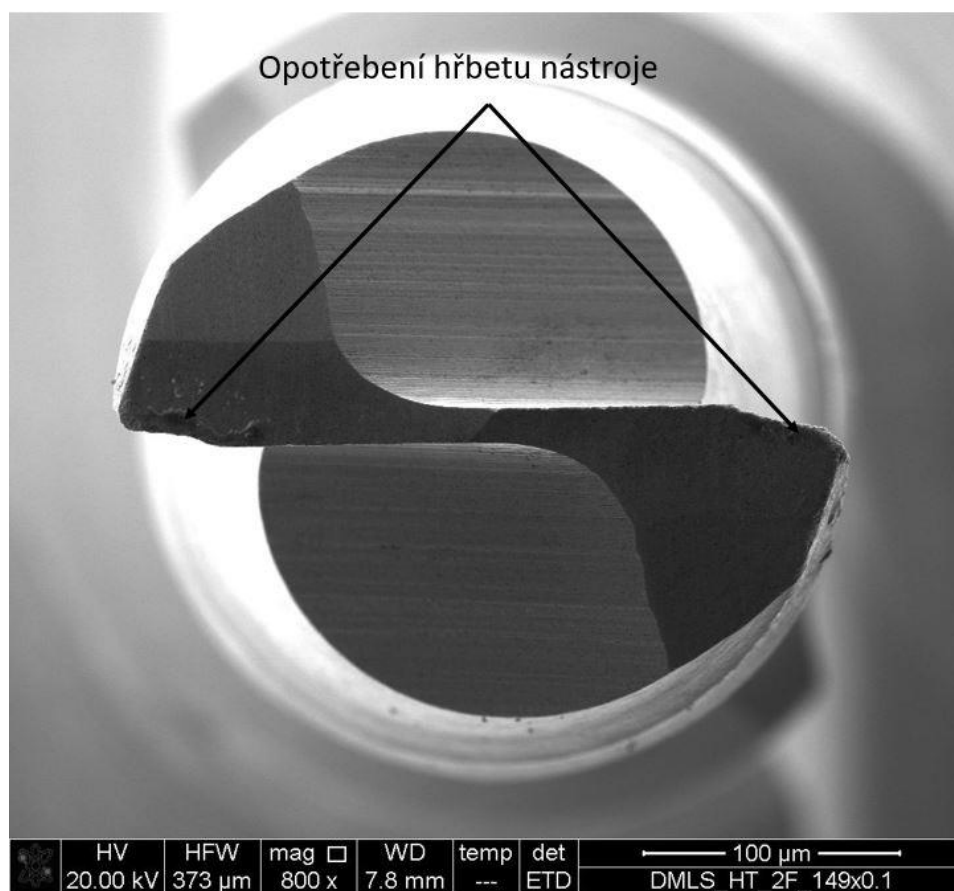
Zjišťování opotřebení nástroje hraje při obrábění významnou roli. Velikost opotřebení významně ovlivňuje řezný proces a projevuje se na celkové kvalitě výsledné součásti. V případě, že nedojde k včasné výměně opotřebovaného nástroje, hrozí jeho destrukce a následné snižování produktivity stroje vlivem jeho odstávky. V obráběcím průmyslu je až 20 % problémů přisuzováno právě nástrojům. Přehled o aktuálním stavu opotřebení nástroje je tak prioritou jak z důvodu destrukce nástrojů, tak i za účelem dosažení vysoké kvality povrchu a minimalizace tvorby otřepů. Studie opotřebení nástrojů se obvykle řídí stanovenými protokoly v normách ISO 8688-1 a ISO 8688-2. Při mikro-frézování však nelze tyto normy použít a odhalení stavu nástroje je problematické z důvodu jeho velmi malých rozměrů a nelze tak prostým okem odhalit některé vady. [62, 63]

Vzhledem k tomu, že poloměr ostří břitů nástroje dosahuje téměř velikosti zrn obrobku, nastává zvýšení plastické deformace, což má za následek rychlejší opotřebení nástroje. Vysoké řezné rychlosti způsobí rovněž rychlejší opotřebení nástroje, naproti tomu mírné zvýšení řezné rychlosti stabilizuje řezný proces a rychlost opotřebení snižuje. Při mikro-frézování obvykle dochází k abrazivnímu opotřebení hřbetu (obrázek 3.6). Výsledkem je tření hřbetu nástroje a vznik plastické deformace na obrobku. Obdobný problém je tvorba nárůstku, který zvětšuje poloměr ostří břitů nástroje, což má za následek vznik velikostního efektu [63].



Obr. 3.6 Rozdílné typy hřbetního opotřebení a) rovnoměrné opotřebení, b) nerovnoměrné opotřebení, c) lokální opotřebení [63].

Jednou z metod, jak detekovat opotřebení mikro-nástroje, je zhodnocení celkových parametrů zhotovené součásti. Hlavními faktory pro posouzení stavu nástroje je výsledná struktura povrchu obrobené plochy a tvorba otřepů. Při zvýšené hodnotě opotřebení nástroje obrobek vykazuje značné zhoršení struktury povrchu obrobené plochy a špatné tvorby třísky a plastické deformace. Vznik plastické deformace také způsobuje vytlačení materiálu z místa řezu a značné zvýšení tvorby otřepů z hlediska jeho množství i velikosti. Během řezného procesu vlivem opotřebení nástroje se mění poměr velikostí řezné a pasivní síly. Měřením a vyhodnocováním těchto sil, lze detekovat velikost opotřebení [62, 63]. U mikro-frézování dosahují řezné síly rozmezí 0,5–3,0 N [7]. Přesné měření sil vyžaduje měřicí zařízení, které je schopno měřit síly v řádu několika newtonů a s dostatečnou přesností.



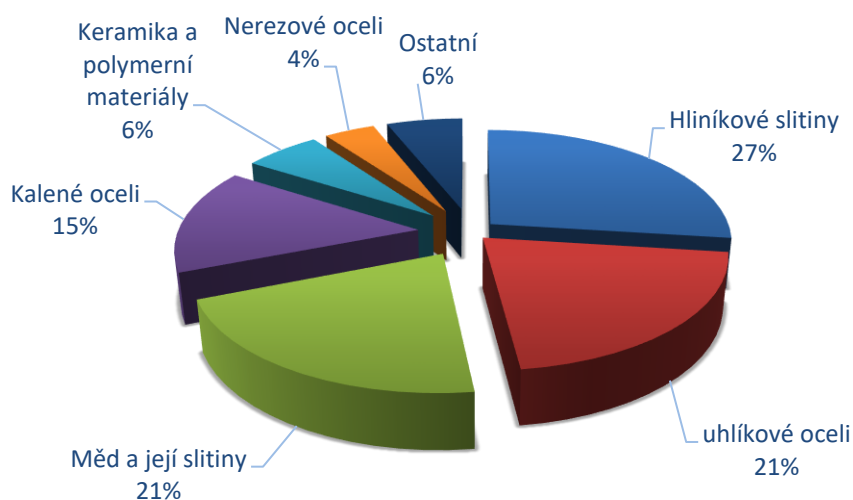
Obr. 3.7 Adhezní opotřebení hřbetu nástroje mikro-nástroje o průměru 0,3 mm [24].

4 APLIKACE A VYUŽITÍ MIKRO-FRÉZOVÁNÍ

Současná technologická zařízení vyžadují výrobu velmi přesných součástí a tím jsou kladeny vysoké nároky na výrobní technologie. Moderním trendem průmyslových odvětví je miniaturizace vyráběných dílů z důvodu úspory místa a materiálu. S nástupem a rozvojem výpočetní techniky lze vyrábět stále menší a přesnější součásti, než tomu bylo v minulosti. Mikro-frézování tak nachází stále větší uplatnění jako způsob výroby těchto součástí. Mezi hlavní odvětví využívající mikro-frézování patří medicína, elektrotechnika, letectví, optický a hodinářský průmysl. [2]

4.1 Materiály pro výrobu součástí mikro-frézováním

Typické materiály pro výrobu součástí technologií mikro-frézováním jsou obvykle materiály s nízkou tvrdostí, které lze snadno obrábět. Nejvíce používaný materiál je hliník a hliníkové slitiny z důvodu dobré obrobitelnosti. V současnosti je velkou výzvou obrábění těžkoobrobitelných materiálů, které mají v technické praxi velké využití. Příkladem jsou kalené oceli, titanové slitiny nebo keramické materiály [60]. Rozdělení materiálu pro výrobu součástí mikro-frézováním zobrazuje obrázek 4.1.



Obr. 4.1 Typické materiály pro výrobu součástí mikro-frézováním(podle [60]).

4.2 Využití mikro-frézování v medicíně

Hlavní aplikace technologie mikro-frézování je v oblasti medicíny. Jedná se převážně o výrobu dentálních a kloubových náhrad z titanových a chrom-kobaltových slitin. Dále jsou to:

- mikro-nástroje pro chirurgické účely
- mikro-kanálky „lab-on-a-chip“
- formy pro výrobu zubních a kloubových náhrad
- oční protézy

4.2.1 Dentální protetika

Výroba dentálních (zubních) náhrad zaznamenala v posledních letech velký pokrok. S rozvojem CNC strojů a vývojem mikro-frézování je možné vyrábět velmi přesné zubní implantáty. Existuje mnoho důvodů, proč jsou zubní korunky vhodnou náhradou pro zuby, jako je například vyplnění odlomené části zubu nebo zakrytí zbarveného povrchu zubu z estetických důvodů. Aktuálně je v k dispozici celá řada materiálů k výrobě implantátů, jako je např. chrom-kobaltová slitina (CrCo). Výběr toho nejvhodnějšího se odvíjí od charakteru náhrady a cenové dostupnosti [64].

Chrom-kobaltová slitina (CrCo) je nejpoužívanější materiál pro frézování zubních náhrad. Materiál poskytuje velmi dobrou chemickou odolnost, je cenově dostupný a je u něj prokázán minimální výskyt alergických reakcí. Vzhledem k jeho dobře obrobenému povrchu je frézování CrCo v současnosti jedinou technologií pro výrobu šroubovaných konstrukcí pro implantáty s přímým dosedem. Titan vykazuje oproti CrCo vyšší hodnoty pevnosti a nižší měrnou hmotnost (cca 50 %). Z keramických materiálů je hojně využívána zirkon-oxidová keramika (ZrO_2) známá jako zirkon. [28]

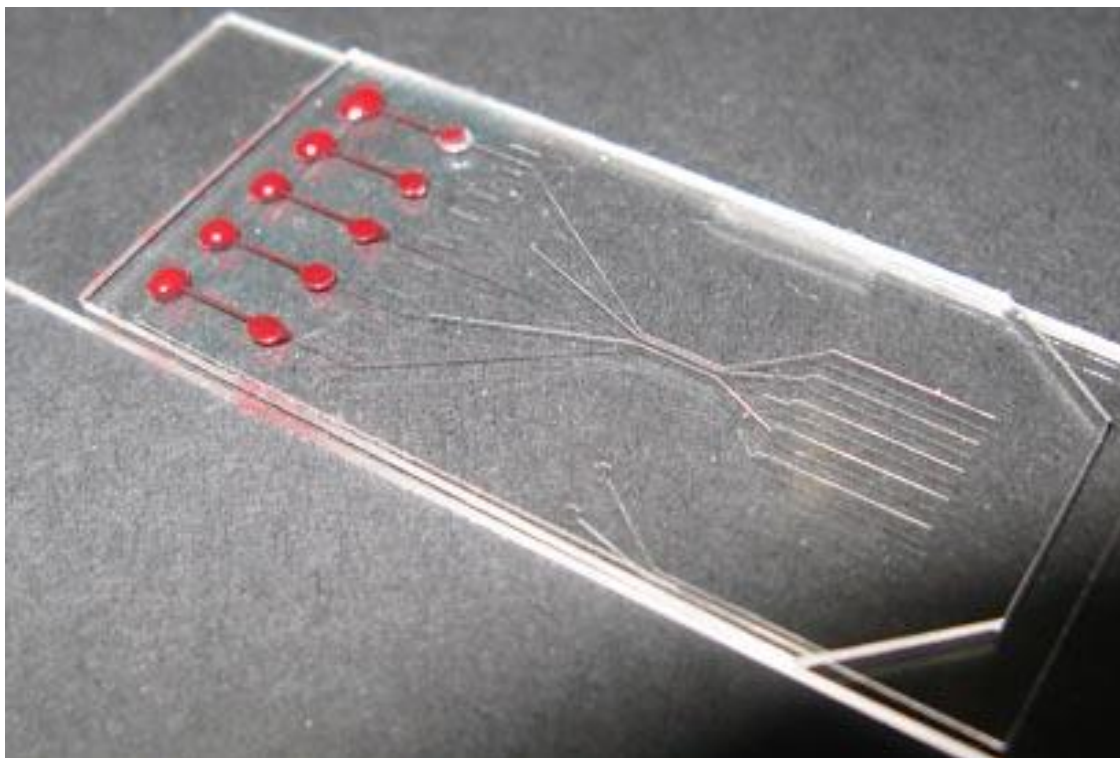


Obr. 4.2 Frézování zubní korunky [65].

4.2.2 Mikro-kanálky „lab-on-a-chip“

Mikro-kanálky „*Lab-on-a chip*“ (LOC) neboli laboratoř na čipu, je zařízení, které začleňuje jednu nebo více laboratorních funkcí na jediném čipu a je nezbytnou součástí mikrofluidiky. Velikost takového zařízení bývá obvykle několik čtverečných milimetrů. LOC umožňuje manipulaci s velmi malým množstvím kapaliny (nanolitry až femtolitry), což napomáhá ke snížení nákladů a zkrácení doby potřebné k analýze kapaliny. Velkou nevýhodou jsou chemické a fyzikální účinky kapaliny především chemické interakce mezi materiály a kapilární síly. Jsou kladeny vysoké nároky na strukturu povrchu [66, 67]. Materiály používané k výrobě LOC jsou převážně plasty jako např. Polyuretan (PUR), Polymethylmethakrylát (PMMA), nebo Polydimethylsiloxane (PDMS) [68].

Výzkum technologie LOC je zaměřen převážně na aplikaci v medicínském oboru v oblasti diagnostiky krevních vzorků. Po vstříknutí kapky krve do kazety krev reaguje s protilátkami umístěných v mikro-kanálkách o velikosti lidského vlasu. Své uplatnění nachází v lékařských ordinacích a v místech s omezeným přístupem k laboratorním zařízením [67]. Obrázek 4.3 zobrazuje čip SIMBAS, který umožňuje vyhodnocovat pět oddělených vzorků současně.

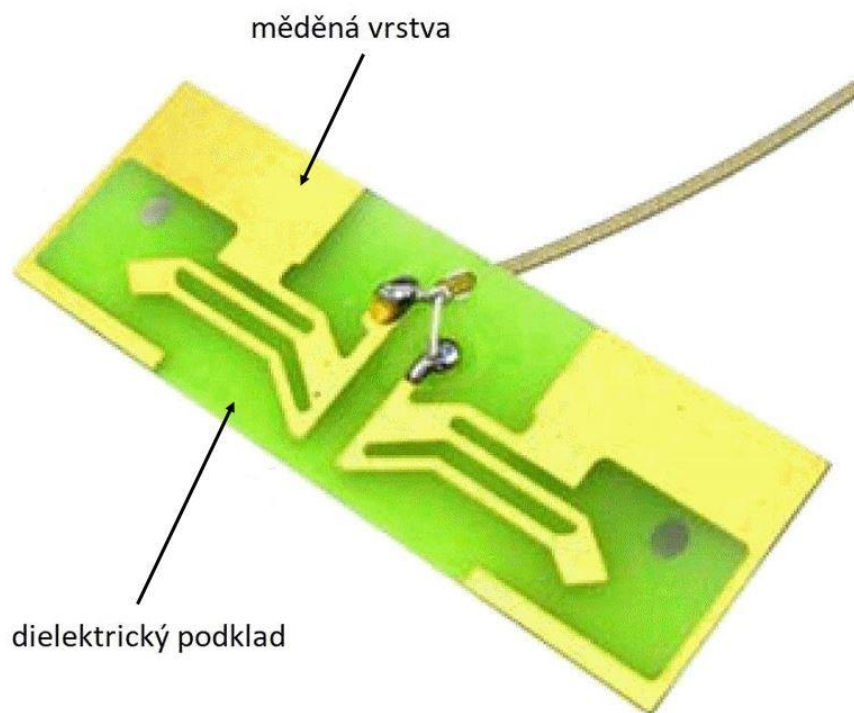


Obr. 4.3 Čip SIMBAS pro vyhodnocování pěti vzorků krve současně [69].

4.3 Mikro-frézování v elektrotechnice

Řada komponentů nacházejících se v elektronických zařízeních dosahuje velmi malých rozměrů a jejich výroba vyžaduje aplikaci mikro-frézování. Jedná se převážně o frézování plastů, hliníkových a měděných slitin. Příkladem jsou konektory, adaptéry, elektronické panely, žebrované chladicí díly [2].

V elektrotechnice je mikro-frézování využito pro výrobu mikro-páskových antén (obrázek 4.4). Nahrazuje tak metodu chemického leptání, která je sice velmi a přesná, ale proces je složitý a snad může způsobit znečištění životního prostředí. Velkou výhodou výroby mikro-frézováním oproti leptání je jednak vysoká přesnost a nízké náklady, ale především možnost trojrozměrné možnosti výroby. Ve srovnání výroby pomocí laserové technologie je mikro-frézování méně energeticky náročné. Nevýhodou je poměrně velká tvorba otřepů, kterou je ale možno minimalizovat vhodnou strategií frézování a optimálními reznými podmínkami [70].



Obr. 4.4 Mikro-pásková anténa [70].

4.4 Obecné aplikace mikro-frézování

Vlivem miniaturizace nachází technologie mikro-frézování stále větší uplatnění a lze prakticky aplikovat ve všech odvětvích, kde je zapotřebí výroba přesných součástí malých rozměrů. Dalšími oblastmi, kde je aplikována technologie mikro-frézování, jsou:

- letectví, výroba součástek gyroskopů a drobných součástí
- významnou aplikaci je výroba nástrojů pro jiné technologie, jako například výroba elektrod pro elektroerozivní obrábění nebo vstřikovací formy
- výroba hodinářském průmyslu, zhotovování velmi malých a přesných součástí, jako jsou těla hodinek (obrázek 4.5) ozubená kola, rohatky a západky



Obr. 4.5 Frézování základního těla hodinek [71].

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá problematikou moderních trendů v oblasti frézování a mikro-frézování formou řešerše. Úvodní část definuje technologii třískového obrábění. Byly specifikovány rozdíly mezi mikro-frézováním a konvenčním frézováním z hlediska rozměrů nástrojů a oblasti použití.

V oblasti modernizace strojů je v současnosti využíváno převážně 5osích obráběcích strojů, jako je například frézka Dantron D5 LS, která je speciálně určená pro výrobu v dentálním průmyslu. Automatický výměník nástrojů nabízí funkci sledování aktuálního poškození nástroje a bezobslužný provoz zajišťuje integrovaná automatická výměna polotovaru. Pro upínání mikro-fréz je využíváno tepelného a polygonálního upínacího systému. Tyto systém jsou rotačně symetrické a poskytují stupeň vyvážení G2,5 při 25 000 min⁻¹.

Převážná část nástrojů pro mikro-frézování je vyráběna klasickou technologií broušení. Moderní metodou výroby mikro-fréz je metoda fokusovaného iontového svazku a laserové obrábění. Výhodou těchto metod je možnost výroby nástrojů o průměru v řádu desítek mikrometrů, ale její použití je omezeno z důvodu finanční a časové náročnosti. Při povlakování nástrojů je nutné dbát na co nejmenší tloušťku povlaku z důvodu zachování malého poloměru zaoblení ostří nástroje. Vhodnou technologií je metoda HIPIMS, kterou je možné dosáhnout vyšší hustoty filmu s tloušťkou přibližně 2 µm.

Progresivní strategii frézování pro dokončovací operace poskytuje použití nástrojů s částečným tvarem kulové plochy. Tyto nástroje umožňují značné zvýšení kroku při 5osém frézování štíhlých tvarů při zachování stejné kvality obrobenej plochy. To má za následek nárůst produktivity obrábění. Oblast vývoje CAD/CAM softwarů pro dentální průmysl nabízí firma Follow-me inovativní systém HyperDENT. Software poskytuje modul Hybrid, který spojuje aditivní technologii 3D tisku s technologií třískového obrábění. Modul ASC (*Anglulated Screw Channel Module*) je přímo určený pro obrábění angulovaných zubních náhrad. V elektronické verzi práce jsou slova klíčová slova, jako např. HyperDENT formou hypertextových odkazů, které poskytují podrobné informace o softwaru.

V kapitole 3 je prezentována studie vlivu použití dvoubřité a čtyřbřité mikro-frézy na celkovou kvalitu obrobenej plochy. Dvoubřité frézy vykazují lepší skututuru povrchu při použití vyšších řezných rychlostí. Při použití čtyřbřité frézy skututuru povrchu více ovlivňuje velikost posuvu, než řezná rychlost. Tvorbu otřepů značně ovlivňuje velikost posuvu. Podle celkové kvality povrchu lze určovat velikost opotřebení řezných nástrojů pro mikro-frézování.

Výstupem této práce je stručná databáze použitých odborných literárních zdrojů, které jsou k dispozici v elektronické příloze a na internetovém úložišti google disk.

<https://drive.google.com/drive/folders/14DYBIIfVdVYfw0DOsmQpSpwBX5gBoeA6?usp=sharing>

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění - 1.část Studijní opory*. VUT FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění, 2006.
2. CHENG, K. a Dehong HUO. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2013. ISBN 978-0-470-97287-8.
3. ALTING, L., F. KIMURA, H.N. HANSEN a G. BISSACCO. Micro Engineering. *CIRP Annals* [online]. 2003, **52**(2), 635-657 [cit. 2019-02-18]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60208-X. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000785060760208X>
4. BIERMANN, Dirk a Philip KAHNIS. Mikrofrézování jemných tvarů a struktur ve výrobě forem. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2010, **2010/12**, str. 10. ISSN 1212-2572.
5. TAKEUCHI, Y., H. SUZUKAWA, T. KAWAI a Y. SAKAIDA. Creation of Ultra-precision Microstructures with High Aspect Ratios. *CIRP Annals* [online]. 2006, **55**(1), 107-110 [cit. 2019-03-15]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60377-1. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607603771>
6. HOSSEINI, Seyed Vahid a Mehrdad VAHDATI. Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining. *Computational Materials Science*[online]. 2012, **65**, 29-36 [cit. 2019-02-08]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.06.037. ISSN 09270256. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025612004089>
7. JIN, Cheng-Zhe, Ik-Soo KANG, Jin-Hyo PARK, Su-Hoon JANG a Jeong-Suk KIM. The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel. *Journal of Mechanical Science and Technology* [online]. 2009, **23**(10), 2823-2829 [cit. 2019-03-11]. DOI: 10.1007/s12206-009-0804-7. ISSN 1738-494X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12206-009-0804-7>
8. ALAMI, J., S. BOLZ a K. SARAOKINOS. High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2009, **483**(1-2), 530-534 [cit. 2019-03-05]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.08.104. ISSN 09258388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838808019063>

9. HUO, Dehong, Kai CHENG a Frank WARDLE. Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill. Part 1: holistic design approach, design considerations and specifications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2010, **47**(9-12), 867-877 [cit. 2019-04-17]. DOI: 10.1007/s00170-009-2128-2. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-009-2128-2>
10. Metal Cutting Tools. *WNT* [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/uk.html>
11. New Way Air Bearings. *Frictionless Motio. New Way Air Bearings - Frictionless Motion* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.newwayairbearings.com/>
12. KERN Micro. *Kern Microtechnik* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.kern-microtechnik.com/en/machine-tool-manufacture/products/kern-micro/>
13. The online industrial exhibition: sensors, automation, motors, pumps, materials handling, packaging, etc. *Direct Industry* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/whizcut-sweden-ab/product-26895-1106665.html>
14. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001, 270 s.
15. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN isbn978-80-254-2250-2.
16. PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. Řezné materiály současnosti. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2018, **2018/5**, str. 50. ISSN 1212-2572.
17. SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3596-9.
18. Cutting tool materials. *Sandvik* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>

19. GILLE, G, B SZESNY, K DREYER, H VAN DEN BERG, J SCHMIDT, T GESTRICH a G LEITNER. Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[online]. 2002, **20**(1), 3-22 [cit. 2019-04-17]. DOI: 10.1016/S0263-4368(01)00066-X. ISSN 02634368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026343680100066X>
20. ELUC. *Elektronická učebnice* [online]. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1219>.
21. SCHUBERT, Andrea a kol. Vyšší spolehlivost při mikrofrézování kalených ocelí. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2012, **2012/5**. ISSN 1212-2572.
22. Vyšší spolehlivost při mikrofrézování kalených ocelí. *Nejčtenější strojírenský časopis* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyssi-spolehlivost-pri-mikrofrezovani-kalenych-oceli.html>
23. HAJRI, M., J. PFAFF, H. BÜTTNER, M. VOEGTLIN, R. KAUFMANN a K WEGENER. Fabrication of a ball end nose micro milling tool by tangential laser ablation. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **77**, 654-657 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.184. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118310333>
24. RYSAVA, Zdenka, Stefania BRUSCHI, Miroslav PISKA a Jan ZIDEK. COMPARING THE PERFORMANCE OF MICRO-END MILLS WHEN MICRO-MILLING OF ADDITIVE MANUFACTURED TI-6AL-4V TITANIUM ALLOY. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(04), 2543-2546 [cit. 2019-04-24]. DOI: 10.17973/MMSJ.2018_11_201823. ISSN 18031269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/november-2018.html#201823>
25. HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 3. část. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program*. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2005

26. ALI, M. Y. a A. S. ONG. Fabricating micromilling tool using wire electrodischarge grinding and focused ion beam sputtering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2006, **31**(5-6), 501-508 [cit. 2019-02-11]. DOI: 10.1007/s00170-005-0220-9. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-005-0220-9>
27. 4-Axis vs. 5-Axis Milling Machines: The Numbers Game. *Glidewell Dental Labs - Dental Lab Services & Products - Dental CE* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://glidewelldental.com/education/lab-perspectives-magazine/volume-1-issue-1/4-axis-vs-5-axis-milling-machines-the-numbers-game/>
28. Technologie a materiály. *Microdent - The CAD/CAM company* [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://www.microdent.cz/kategorie-produktu/technologie-a-materialy/>
29. Datron D5 5-axis dental milling machines. *DATRON High Speed CNC Milling Machines, Engraving Machines* [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.datron.com/cnc-machine-products/d5.php>
30. Kugler GmbH. *Microgantry* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.kugler-precision.com/index.php?MICROGANTRY--nano3-5X-EN>
31. Nejvýkonější upínání nástrojů - novinky. *Tepelné upínání* [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.tepelneupinani.cz/novinky/>
32. DVOŘÁK, Luděk. Tepelné upínání nástrojů. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2015, **2015/6**, str. 68. ISSN 1212-2572.
33. Tepelný upínač ISF 400. *Macmatic* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.macmatic.cz/prislusenstvi/tepelný-upinac-isf-400-1-detail>
34. Tepelný upínač ISF 400. *Schrumpfgeräte, Schrumpftechnik, Schrumpfspule - HAIMER* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.haimer.de/produkte/schrumpftechnik.html>
35. Upínače nástrojů pro mikroobrábění. *Technický týdeník* [online]. [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: https://www.technikytydenik.cz/rubriky/obrabeci-stroje-a-prislusenstvi/upinace-nastroju-pro-mikroobrabeni_44461.htm
36. Clamping Technology. *SCHUNK GmbH* [online]. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_en/clamping-technology/series/tribos-mini/

37. SERVUS, T. *Trendy upínání řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička.
38. Upínače pro mikroobrábění. *Techmagazín.cz* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/1121>.
39. BREMSTAHLER, Andreas. Větší řádkování při obrábění načisto. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2017, **2017/6**, str. 74. ISSN 1212-2572.
40. LU, Yaoan A., Ye DING, Chengyong WANG a Limin ZHU. Tool path generation for five-axis machining of blisks with barrel cutters. *International Journal of Production Research* [online]. 2018, **57**(5), 1300-1314 [cit. 2019-03-18]. DOI: 10.1080/00207543.2018.1470344. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1470344>
41. HyperDENT. *Follow-me, technology group* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.follow-me-tech.com/hyperdent/>
42. Axsys Dental Solutions - Dental CAM Software. *Axsys Dental Solutions - The Trusted Authority in Digital Dental Manufacturing* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.axsysdental.com/Dental%20CAM%20Software.html>
43. HyperDENT V8.2. *Follow-me, technology group* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.follow-me-tech.com/hyperdent-v82>
44. What CAM software really does. *ModernDental network* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.dentalproductsreport.com/lab/article/what-cam-software-really-does?page=0,1>
45. DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing, Element. *Material Testing, Product Qualification Testing, Inspection and Certification Services* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>.
46. LEARY, M. Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM). *Laser Additive Manufacturing* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 99-118 [cit. 2019-05-14]. DOI: 10.1016/B978-0-08-100433-3.00004-X. ISBN 9780081004333. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008100433300004X>

47. Follow-Me, hyperDENT. *The Magazine for 3D Print Technologies* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.3sprintr.com/manufacturers/listing/follow-me-hyperdent>
48. Angulated Screw Channel Module released. *Follow-me, technology group* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.follow-me-tech.com/ascmodule/>
49. Angulated screw channel solutions. *Nobel Biocare* [online]. [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.nobelbiocare.com/international/en/home/products-and-solutions/dental-prosthetic-solutions/dental-prosthetics-for-clinicians/angulated-screw-channel-solution.html>.
50. GIANNUZZI, Lucille A. a F. A. STEVIE. *Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques, and practice*. New York: Springer, c2005. ISBN 978-0-387-23116-7.
51. Mikroobrábění fokusovaným iontovým svazkem. *Fyzikální ústav Akademie věd* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/mikroobrabeni-fokusovany-m-iontovym-svazkem>
52. PÍŠKA, Miroslav. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2014, **2014/11**, str. 70. ISSN 1212-2572.
53. Současnost a trendy povlakování technologií PVD. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2003, **2003/4**, str. 70. ISSN 1212-2572.
54. KUDAPA, S., K. NARASIMHAN, P. BOPPANA a W.C. RUSSELL. Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1999, **120-121**, 259-264 [cit. 2019-03-17]. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00484-3. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897299004843>
55. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM průmyslové spektrum: technický měsíčník*. 2001, **2001/7**, str. 43. ISSN 1212-2572.
56. Magnetron. *FyzWeb* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=44&id_casti=19

57. ANDERS, André. A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS). *Surface and Coatings Technology* [online]. 2014, **257**, 308-325 [cit. 2019-03-05]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.043. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897214007531>
58. HAVLÍKOVÁ, Hana. *Studium povlakovací technologie HIPIMS pro řezné nástroje*. Brno 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 75 s. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
59. KEUNECKE, M., C. STEIN, K. BEWILOGUA, W. KOELKER, D. KASSEL a H. van DEN BERG. Modified TiAlN coatings prepared by d.c. pulsed magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2010, **205**(5), 1273-1278 [cit. 2019-04-12]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.09.023. ISSN 02578972. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897210008479>
60. CÂMARA, M.A., J.C. Campos RUBIO, A.M. ABRÃO a J.P. DAVIM. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science & Technology*[online]. 2012, **28**(8), 673-685 [cit. 2019-03-14]. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7. ISSN 10050302. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>
61. ÖZEL, T., T. THEPSONTHI, D. ULUTAN a B. KAFTANOĞLU. Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools. *CIRP Annals* [online]. 2011, **60**(1), 85-88 [cit. 2019-05-08]. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.087. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611000886>
62. ALHADEFF, L.L., M.B. MARSHALL, D.T. CURTIS a T. SLATTER. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear* [online]. 2019, **420-421**, 54-67 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1016/j.wear.2018.11.018. ISSN 00431648. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164818310433>
63. COLPANI, Alessandro, Antonio FIORENTINO, Elisabetta CERETTI a Aldo ATTANASIO. Tool wear analysis in micromilling of titanium alloy. *Precision Engineering* [online]. 2019, **57**, 83-94 [cit. 2019-05-07]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.03.011. ISSN 01416359. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635919301801>

64. Materials used for dental crown. *MEDICAL CENTER* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.missionviejosmile.com/best-material-for-dental-crown/>
65. *Willemin-Macodel* [online]. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.willemin-macodel.com/en/home>
66. HONGBIN, Yu, Zhou GUANGYA, Chau Fook SIONG, Wang SHOUHUA a Lee FEIWEN. Novel polydimethylsiloxane (PDMS) based microchannel fabrication method for lab-on-a-chip application. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2009, **137**(2), 754-761 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1016/j.snb.2008.11.035. ISSN 09254005. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092540050800796X>
67. What is Lab-on-a-Chip?. *Medical News, Medical Articles* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Lab-on-a-Chip.aspx>
68. VLADISAVLJEVIĆ, Goran T., Nauman KHALID, Marcos A. NEVES, Takashi KUROIWA, Mitsutoshi NAKAJIMA, Kunihiro UEMURA, Sosaku ICHIKAWA a Isao KOBAYASHI. Industrial lab-on-a-chip: Design, applications and scale-up for drug discovery and delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews* [online]. 2013, **65**(11-12), 1626-1663 [cit. 2019-05-02]. DOI: 10.1016/j.addr.2013.07.017. ISSN 0169409X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X13001713>
69. New blood analysis chip could lead to disease diagnosis in minutes, Berkeley News. *Berkeley News, News from the University of California, Berkeley* [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://news.berkeley.edu/2011/03/16/standalone-lab-on-a-chip/>
70. WANG, Xinxin, Xiaohong LU, Zhenyuan JIA, Guangjun LI a Wenyi WU. The application of micro-milling technology in the processing of micro-strip antenna. *International Journal of Materials and Product Technology* [online]. 2015, **51**(1) [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1504/IJMPT.2015.070082. ISSN 0268-1900. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=70082>
71. *Great British Watch Company* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.great-british-watch.co.uk/how-to-become-a-watchmaker-part-one-introduction>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ASC	[-]	anglulated screw channel
CAD	[-]	computer aided desing
CAM	[-]	computer aided manufacturing
CNC	[-]	computer numeric control
CVD	[-]	chemical vapor deposition
DMLS	[-]	direct metod laser sintering
EBM	[-]	electron beam melting
EDM	[-]	electric discharge machining
FIB	[-]	focused ion beam
HIPIMS	[-]	high-power impulse magnetron sputtering
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HSS	[-]	high speed steel
HSS-PM	[-]	high speed steel- powder metallurgy
KNB	[-]	kubický nitrid bóru
LOC	[-]	lab on a chip
MTCVD	[-]	medium temperature chemical vapor deposition
NC	[-]	numeric control
NO	[-]	nástrojová ocel
PDMS	[-]	polydimethylsiloxane
PKD	[-]	polykrystalický diamant
PMMA	[-]	polymethylmethankrylát
PUR	[-]	polyuretan
PVD	[-]	physical vapour deposition
RO	[-]	rychlořezná ocel
SEM	[-]	scanning electron microscope
SK	[-]	slinutý karbid
SLM	[-]	selective laser melting

Symbol	Jednotka	Popis
A_d	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
a_p	[mm]	šířka záběru hlavního ostří nástroje
F_c	[N]	řezná síla
f_n	[mm]	posuv na otáčku
F_p	[N]	pasivní síla
f_z	[mm]	posuv na zub
h	[mm]	tloušťka odřezávané třísky
h_{min}	[mm]	minimální tloušťka třísky
n	[min ⁻¹]	otáčky nástroje
R	[mm]	poloměr zaoblení nástroje
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_o	[mm]	poloměr zaoblení ostří nástroje v ortogonální rovině
R_w	[mm]	efektivní poloměr nástroje
R_z	[μm]	výška maximální nerovnosti profilu
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	rychlost posuvu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Stručný přehled odborných literárních zdrojů

STRUČNÝ PŘEHLED ODBORNÝCH LITERÁRNÍCH ZROJŮ

Zdroj č.	Název	DOI/ISBN
2	Micro-cutting: fundamentals and applications	ISBN 978-0-470-97287-8
3	Micro Engineering	DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60208-X
5	Creation of Ultra-precision Microstructures with High Aspect Ratios	DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60377-1
6	Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining	DOI: 10.1016/j.commatsci.2012.06.037
7	The characteristics of cutting forces in the micro-milling of AISI D2 steel	DOI: 10.1007/s12206-009-0804-7
8	High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications	DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.08.104
9	Design of a five-axis ultra-precision micro-milling machine—UltraMill	DOI: 10.1007/s00170-009-2128-2
19	Submicron and ultrafine grained hardmetals for microdrills and metal cutting inserts	DOI: 10.1016/S0263-4368(01)00066-X
23	Fabrication of a ball end nose micro milling tool by tangential laser ablation	DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.184
24	Comparing the performance of micro-end mills when micro-milling of additive manufactured Ti-Al-4V	DOI: 10.17973/MMSJ.2018_11_201823
26	Fabricating micromilling tool using wire electrodischarge grinding and focused ion beam sputtering	DOI: 10.1007/s00170-005-0220-9
40	Tool path generation for five-axis machining of blisks with barrel cutters	DOI: 10.1080/00207543.2018.1470344
54	Characterization and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings	DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00484-3
57	A review comparing cathodic arcs and high power impulse magnetron sputtering (HiPIMS)	DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.043
59	Modified TiAlN coatings prepared by d.c. pulsed magnetron sputtering	DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.09.023
60	State of the Art on Micromilling of Materials	DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7
61	Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and cBN coated micro-tools	DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.087

Literární zdroje jsou k dispozici v elektronické příloze této práce na internetovém úložišti google disk. Hypertextový odkaz na internetové úložiště:

<https://drive.google.com/drive/folders/14DYBIIfVdVYfw0DOsmQpSpwBX5gBoeA6?usp=ssharing>